



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN

**“Sistema electrónico para el monitoreo de flujo vehicular y
control inteligente de semáforos”**

**TRABAJO MONOGRÁFICO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Elaborado por:

Br. Cinthya Paola Elizabeth Alemán

Br. Juan David Elizabeth Alemán

Br. Rodrigo Antonio González Zambrana

Tutor:

MSc. Alejandro Alberto Méndez Talavera

Managua, septiembre de 2017

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vivir.

A mis padres por brindarme su apoyo incondicional durante todo este tiempo, en especial a mi madre Martha Zambrana.

A nuestro tutor MSc. Alejandro Méndez por compartir sus conocimientos de manera transparente y por su apoyo en cada una de las adversidades que se presentaron a lo largo de este trabajo monográfico.

Rodrigo González

A mi familia.

Juan Elizabeth

A Dios por ser mi principal fortaleza en todo lo que hago.

A mis padres por esmerarse en mi educación intelectual y espiritual.

A mis amigos por todo su apoyo y momentos compartidos.

Cinthya Elizabeth

RESUMEN

La congestión de tráfico vehicular es un problema multidisciplinario donde la principal causa es el incremento de la movilidad causado por el desarrollo de las urbes contra la capacidad casi invariable de las autopistas en Nicaragua. Aunque existe una preocupación evidente por regular de forma dinámica las intersecciones que presentan mayor demanda, la mala operatividad de los medios de control para asignar derecho de paso es evidente, sobre todo en las horas pico.

Por tal motivo decidimos asumir el reto de investigar sobre el fenómeno de la congestión vehicular, sus causas, consecuencias y el estado del arte de la metodología para el análisis operacional de intersecciones semaforizadas, y así brindar una solución que garantizará una mejora a mediano y largo plazo mediante la implementación de un sistema de control de tráfico que es capaz de ajustar sus parámetros de temporización de forma dinámica al flujo vehicular y además enviar esta información de manera remota.

El resultado del presente trabajo es un sistema de control de tráfico vehicular para cuatro fases que ajusta los tiempos de forma dinámica reaccionando ciclo a ciclo a las variaciones de flujo vehicular medido por lazos inductivos incrustados en el pavimento y que además envía información de manera remota haciendo uso de tecnología GSM. La prueba operacional del sistema de control de tráfico se realizó sobre un simulador de tráfico microscópico de código abierto obteniendo una mejora en el tiempo de espera promedio de hasta un 17.77% si se compara con una estrategia de control de tiempo fijo.

ABSTRACT

Vehicle flow congestion is a multidisciplinary issue where the main cause is the growing mobility produced by the urban development versus the almost-constant capacity of the Nicaraguan highways. Although there is an evident concern about the dynamic management of the most demanded intersections, a poor administration of the traffic control devices in the right-of-way assignment is evident, particularly in rush hours.

For such reason, we took charge the challenging research about the vehicle congestion issue: its causes, its consequences and the state-of-the-art methodology addressing the operational analysis of semaphored intersections, and in this way to give a solution that guarantees a middle-term and a long-term improvement by means of the implementation of a traffic control system capable of adjusting dynamically its temporization parameters to the vehicle flow and moreover send this information remotely.

The result of the present work is a four-phase traffic control system that adjusts time dynamically reacting cycle-to-cycle to the vehicle flow variations measured by the inductive loops incrustated in the pavement and, furthermore, send information remotely by means of the GSM technology. The operational test of the traffic control system was carried out over an open-source microscopic traffic simulator.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	2
JUSTIFICACIÓN	3
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO	5
1 SUBSISTEMA DE CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR	5
1.1 Introducción	5
1.2 Operación de las señales de tráfico.....	6
1.2.1 Parámetros de temporización	6
1.2.2 Asignación de fases.....	7
1.3 Sistemas de control de tráfico.....	9
1.3.1 Controlador de tiempo fijo.....	9
1.3.2 Controlador accionado por el tráfico	9
1.3.3 Control adaptativo al tráfico	10
1.3.4 Trafico responsivo no optimizado	10
1.4 Variables de control	11
1.4.1 Intersección aislada	11
1.4.2 Flujo	11
1.4.3 Velocidad	11
1.4.4 Densidad.....	13
1.4.5 Capacidad.....	14
1.4.6 Nivel de servicio.....	14
1.4.7 Demora	16
1.4.8 Intervalo (headway)	17
1.4.9 Ocupación y espacio tiempo	18
1.4.10 Grado de saturación (relación volumen/capacidad).....	19
1.5 Sistemas de control	21
1.5.1 Lógica difusa.....	21
1.5.2 Conjuntos difusos y variable lingüística	22
1.5.3 Control difuso.....	23
1.6 Simuladores de tráfico vehicular.....	26

1.6.1	Utilidad de la simulación de trafico.....	26
1.6.2	Modelos de simulación macroscópica	27
1.6.3	Modelos de simulación microscópicos.....	29
1.6.4	Simulación de movilidad urbana (SUMO)	30
1.6.5	Hardware-In-The-Loop.....	32
1.7	Subsistema de detección vehicular	33
1.8	Sensores de flujo de tráfico	34
1.9	Detector de lazo inductivo	36
1.10	Modelo de detección vehicular	38
1.11	Sistemas de medición.....	41
1.11.1	Lazo inductivo	43
1.11.2	Medidor de inductancia.....	45
1.11.3	Procesador de datos.....	49
1.11.4	Presentador de datos.....	51
1.11.5	Transmisor de datos	52
1.11.6	Fuente de alimentación.....	52
1.12	Subsistema de monitoreo de flujo vehicular	53
1.13	Sistemas de comunicación inalámbrica.....	53
1.13.1	Módulo módem GSM/GPRS.....	54
1.13.2	Comandos AT	55
1.14	Lenguajes de programación	56
1.15	Fuente de alimentación	57
CAPITULO II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE TRÁFICO.....		58
2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DE FLUJO VEHICULAR Y CONTROL INTELIGENTE DE SEMÁFOROS.....		58
2.1	Subsistema de detección vehicular	59
2.2	Determinación de los componentes del subsistema de detección.....	60
2.2.1	Lazo inductivo	60
2.2.2	Oscilador LC	61
2.2.3	Contador de frecuencia.....	63

2.2.4	Interfaz de usuario	64
2.2.5	Interfaz de comunicación	66
2.2.6	Procesador de datos.....	67
2.3	Simulación y rediseño del sistema.....	69
2.3.1	Oscilador LC	69
2.3.2	Contador de frecuencia.....	70
2.3.3	Procesador de datos.....	73
2.3.4	Detector de lazo inductivo.....	74
2.4	Emulación a escala.....	76
2.4.1	Lazo de 30 cm	76
2.4.2	Lazo de 1 metro	77
2.5	Prueba de campo	78
2.5.1	Tabla de nodos	78
2.5.2	Tarjeta impresa	79
2.6	Modelo del subsistema de control de tráfico vehicular	81
2.7	Determinación del escenario de tráfico.....	83
2.7.1	Consideraciones estáticas de la intersección seleccionada	85
2.7.2	Consideraciones de demanda vehicular	86
2.7.3	Características físicas de los elementos de medición.....	90
2.8	Diseño del controlador de tráfico vehicular	92
2.8.1	Elección del microcontrolador	94
2.8.2	Procesamiento de datos	97
2.8.3	Algoritmo de toma de decisiones difuso	100
2.8.4	Comunicación RS-232	112
2.8.5	Comunicación RS-485	113
2.8.6	Envío de datos vía I2C.....	114
2.8.7	Diagrama esquemático	115
2.8.8	Simulación	116
2.9	Simulación del sistema de transporte vehicular	117
2.9.1	Construcción del escenario estático	117
2.9.2	Algoritmo de generación de demanda	120
2.9.3	Interfaz de control de tráfico (TRACI)	123
2.9.4	Resultados obtenidos	125
2.10	Implementación en tarjeta impresa.....	128
2.11	Modelo del subsistema de monitoreo de flujo vehicular	129
2.12	Determinación de los componentes del subsistema de monitoreo	130

2.12.1	Módulo módem	130
2.12.2	Microcontrolador	130
2.11.3	Interfaz de monitoreo	133
2.13	Prueba de campo	135
3.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	138
4.	BIBLIOGRAFÍA.....	141

Lista de figuras

Capítulo I

1.1 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TEMPORIZACIÓN Y ASIGNACIÓN DE FASE. ADAPTADO DE AKCELIK (1978).....	7
1.2 IZQUIERDA: DOS FASES CON GIROS A LA DERECHA PERMITIDOS. DERECHA: AL PROTEGER LOS GIROS EL NÚMERO DE FASES INCREMENTA A CUATRO. TOMADO DE GORDON (2005).	8
1.3 DIAGRAMA ESPACIO-TIEMPO ILUSTRANDO EL CONCEPTO DE VELOCIDAD Y DEMORA. LA LÍNEA DISCONTINUA INDICA LA VELOCIDAD DE FLUJO LIBRE, LAS CAÍDAS DE PENDIENTE INDICAN DEMORA.....	12
1.4 RELACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS VARIABLES FUNDAMENTALES DEL TRÁFICO. ADAPTADO DE ROESS (2004).....	13
1.5 DEFINICIÓN DE INTERVALO VEHICULAR, OCUPACIÓN Y ESPACIO TIEMPO. VARIABLES MEDIDAS POR UN LAZO DE INDUCTIVO DE TIPO PRESENCIA. ADAPTADO DE AKCELIK (2002).....	18
1.6 SALIDA DE UN DETECTOR TIPO PRESENCIA Y TIPO PASO. LA OCUPACIÓN EN UN DETECTOR TIPO PRESENCIA TIENE SIEMPRE UN VALOR MAYOR. ADAPTADO DE AKCELIK (2002)	18
1.7 DEMORA PROMEDIO EN FUNCIÓN DEL GRADO DE SATURACIÓN Y EL NIVEL DE SERVICIO. ADAPTADO DE AKCELIK (1978).	20
1.8 DIFERENCIA ENTE CONJUNTO CLÁSICO Y CONJUNTO DIFUSO. TOMADO DE ROSS (2010).	22
1.9 TIPOS DE FUNCIONES DE PERTENENCIA. (CAPTURA DE PANTALLA)	23
1.10 CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN CONTROLADOR DIFUSO TIEMPO MAMDANI	24
1.11 REPRESENTACIÓN DE ALGUNOS MÉTODOS DE DEFUSIFICACIÓN: A) COG, B) SUMA DE LOS CENTROS, C) PROMEDIO PONDERADO, D) MEDIA DE LOS MÁXIMOS.....	25
1.12 EJEMPLO DE REDES ABSTRACTAS CONSTRUIDAS USANDO “NETGENERATE”; DE IZQUIERDA A DERECHA: GRILLADA, TELA DE ARAÑA, ALEATORIA.	31
1.13 FLUJO DE DATOS ENTRE LA PLANTA SIMULADA Y EL CONTROLADOR. (CAPTURA DE PANTALLA)	32
1.14 LAZOS INDUCTIVOS DESPLEGADOS EN UNA INTERSECCIÓN SEMAFORIZADA.	34
1.15 DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO. TOMADO DE KLEIN (2006)	37
1.16 MODELO DE DETECCIÓN VEHICULAR PARA UNA BICICLETA. TOMADO DE KLEIN (2006) ..	40
1.17 MODELO DE DETECCIÓN VEHICULAR PARA UN AUTOMÓVIL. TOMADO DE KLEIN (2006) ..	40
1.18 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN. TOMADO DE MORRIS (2001)	42
1.19 DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO COMO SISTEMA DE MEDICIÓN.	42
1.20 MODELO AC DE DOS OSCILADORES LC COMUNES: (A) COLPITTS Y (B) HARTLEY	45
1.21 ESTRUCTURA DE UN CONTADOR DE FRECUENCIA RECÍPROCO	48
1.22 DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO C-1000 DE RENO A&E	52
1.23 SUBSISTEMA DE MONITOREO DE FLUJO VEHICULAR.....	53

Capítulo II

2.1 SUBSISTEMA DE DETECCIÓN VEHICULAR DESPLEGADO EN UNA INTERSECCIÓN SEMAFORIZADA.	59
2.2 DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO TEMPORAL CONSTRUIDO E INSTALADO EN BASE A CINTA PARA DUCTOS	61
2.3 PRIMER OSCILADOR LC DEL DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO.....	63
2.4 PRIMER CONTADOR DE FRECUENCIA DEL LAZO INDUCTIVO.	64
2.5 INTERFAZ DE USUARIO Y DE COMUNICACIÓN DEL DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO..	66
2.6 SEUDOCÓDIGO PARA EL CÁLCULO DE LA FRECUENCIA DE NO VEHÍCULO. ADAPTADO DE MASHER (1975).	68
2.7 DIAGRAMA DE FLUJOS PARA EL CÁLCULO DE LA FRECUENCIA DE NO VEHÍCULO. ADAPTADO DE MASHER (1975).	69
2.8 OSCILADOR LC DEL DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO FINALIZADO.....	70
2.9 SEGUNDO CONTADOR DE FRECUENCIA DEL DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO.....	71
2.10 CONTADOR DE FRECUENCIA DEL DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO FINALIZADO.	72
2.11 DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO SIMULADO EN PROTEUS. SE EXCLUYEN DE LA SIMULACIÓN EL OSCILADOR LC Y EL LAZO INDUCTIVO DEBIDO A LOS ALTOS REQUERIMIENTOS COMPUTACIONALES.	74
2.12 CUADRO DE DIÁLOGO DEL GENERADOR DE SEÑALES EASY HDL DE PROTEUS UTILIZADO PARA EMULAR LAS SEÑALES PROPORCIONADOS POR UN OSCILADOR LC Y LAZO INDUCTIVO BAJO FLUJO VEHICULAR.....	75
2.13 LAZO INDUCTIVO DE 30 CM.	76
2.14 LAZO INDUCTIVO DE 1 METRO.	77
2.15 LAZO INDUCTIVO DE 1 METRO EN EL PARQUEO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA.	78
2.16 PISTAS Y TARJETA PCB DEL DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO	79
2.17 ESQUEMA GENERAL DEL SUBSISTEMA DE CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR.....	81
2.18 LAYOUT DE LA INTERSECCIÓN SOBRE LA QUE SE APLICARA EL CONTROL INTELIGENTE DE SEMÁFOROS, LOS NÚMEROS IMPARES INDICAN MANIOBRAS DE GIROS, LOS PARES MOVIMIENTOS HACIA EL FRENTE. (ELABORACIÓN PROPIA).	82
2.19 PROPUESTA INICIAL DE LA INTERSECCIÓN A IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE CONTROL DE TRÁFICO UBICADA ENTRE CALLE INMACULADA Y AVENIDA ARELLANO. (CAPTURA DE PANTALLA).	84
2.20 DIAGRAMA ANILLO-BARRERA PARA ASIGNACIÓN DE SECUENCIA DE FASES USUALMENTE USADA POR CONTROLADORES NEMA. EN ESTE CASO SE PRESENTA UN ESQUEMA “LEADING- LEFT TURN”. (ELABORACIÓN PROPIA).	86
2.21 DISTRIBUCIÓN DE INTERVALO DE LLEGADAS QUE SE USARÁ PARA LA GENERACIÓN DE LLEGADAS, SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN DE PEARSON III. ADAPTADO DE MAY (1990).....	89
2.22 RELACIÓN ESPACIO TIEMPO – VELOCIDAD COMO FUNCIÓN DE LA LONGITUD DEL ÁREA DE DETECCIÓN PARA UNA INTERSECCIÓN AISLADA Y MOVIMIENTO HACIA EL FRENTE. TOMADO DE AKCELIK (1994).....	91

2.23 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DEL LAZO INDUCTIVO Y SU UBICACIÓN SOBRE LAS LÍNEAS DE ACCESO.	92
2.24 FLUJOGRAMA DEL PROCESO DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.	97
2.25 FUSIFICACIÓN TOMANDO COMO CONJUNTO SINGLETON EL VALOR DE ENTRADA “CRISP”. EL PRODUCTO CARTESIANO CORRESPONDE AL VALOR FUSIFICADO. (ELABORACIÓN PROPIA).....	103
2.26 FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA LA VARIABLE LINGÜÍSTICA “GRADO DE SATURACIÓN”. (ELABORACIÓN PROPIA).	104
2.27 MECANISMO DE INFERENCIA DE MAMDANI. EL CONJUNTO C’ RESULTA DE LA COMPOSICIÓN ENTRE EL HECHO Y LA REGLA DIFUSA. (ELABORACIÓN PROPIA).	105
2.28 INFERENCIA TIPO MAMDANI CON OPERADOR T-NORM DE PRODUCTO ALGEBRAICO. (CAPTURA DE PANTALLA DEL SOFTWARE XFUZZY).....	107
2.29 CONJUNTOS DIFUSOS DE SALIDAS SIMÉTRICOS PARA LA VARIACIÓN DE CICLO Y FASE. (ELABORACIÓN PROPIA).	110
2.30 A) SUPERFICIE DE CONTROL PARA EL PORCENTAJE DE CAMBIO EN LA DIVISIÓN DE FASE. B) SUPERFICIE DE CONTROL PARA EL CAMBIO DE CICLO.	111
2.31 APLICACIÓN TÍPICA DEL MAX232. TOMADO DE: HTTP://WWW.ALLDATASHEET.COM	113
2.32 APLICACIÓN TÍPICA DEL MAX485. TOMADO DE: HTTP://WWW.ALLDATASHEET.COM	114
2.33 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO EL SISTEMA DE CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR.	115
2.34 SISTEMA DE CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR DIFUSO.	116
2.35 PROCEDIMIENTO COMÚN PARA LA GENERACIÓN DE UN ESCENARIO EN SUMO. ADAPTADO DE KRAJZEWICZ ET AL., (2012).	118
2.36 PARÁMETROS DE ENTRADA PARA NETCONVERT. EL ARCHIVO SE GUARDA COMO BUILT.NETCCFG.XML	119
2.37 VISUALIZACIÓN DEL ENTORNO DE TRANSPORTE URBANO MEDIANTE LA HERRAMIENTA SUMO-GUI INCLUIDA EN EL PAQUETE DE INSTALACIÓN DE SUMO. (CAPTURA DE PANTALLA).	119
2.38 SINTAXIS DEL ARCHIVO DE CONFIGURACIÓN PARA LOS SENSORES DE LAZO INDUCTIVO.	120
2.39 FLUJOGRAMA PARA LA GENERACIÓN DE DEMANDA.	121
2.40 CÓDIGO EN PYTHON PARA LA GENERACIÓN DE DEMANDA DE UNA SOLA RUTA.	122
2.41 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR Y EJEMPLO DE ALGUNOS COMANDOS Y SU RESPUESTA ENTRE EL SIMULADOR (SOFTWARE) Y EL CONTROLADOR DE TRÁFICO (HARDWARE). ELABORACIÓN PROPIA.	123
2.42 ARQUITECTURA HARDWARE-IN-THE-LOOP. TRACI PERMITE EL INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN ENTRE EL CONTROLADOR IMPLEMENTADO SOBRE UNA PLATAFORMA FÍSICA Y EL SIMULADOR DE TRÁFICO.....	124
2.43 COMPARACIÓN ENTRE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL DE TIEMPO FIJO Y CONTROL DIFUSO.	126
2.44 IZQUIERDA: PISTAS DISEÑADAS EN EAGLE. DERECHA: TARJETA CON LAS PISTAS IMPRESAS. (ELABORACIÓN PROPIA).	128
2.45 ESQUEMA GENERAL DEL SUBSISTEMA DE MONITOREO DE TRÁFICO VEHICULAR	129
2.46 FLUJOGRAMA DEL TRANSMISOR DEL SUBSISTEMA DE MONITOREO.....	132

2.47 FLUJOGRAMA DE LA INTERFAZ DE MONITOREO.....	134
2.48 CÓDIGO EN LA PLATAFORMA DE SOFTWARE ECLIPSE	136
2.49 INTERFAZ DE MONITOREO DE FLUJO VEHICULAR.....	137

Lista de tablas

Capítulo I

TABLA 1.1 MEDIDA DE EFECTIVIDAD DEFINIENDO EL NIVEL DE SERVICIO. TOMADO DE HCM (2000).....	15
TABLA 1.2 SIMULADORES DE TRÁFICO MACROSCÓPICO.	28
TABLA 1.3 SIMULADORES DE TRÁFICO VEHICULAR MICROSCÓPICOS	29
TABLA 1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES DE FLUJO DE TRÁFICO COMERCIALMENTE DISPONIBLES. ADAPTADO DE KLEIN (2006)	35

Capítulo II

TABLA 2.1 RESULTADOS DE LA PRIMERA PRUEBA DE CAMPO DEL DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO.	80
TABLA 2.2 RESULTADOS DE LA SEGUNDA PRUEBA DE CAMPO DEL DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO	80
TABLA 2.3 CARACTERÍSTICAS DEL MICROCONTROLADOR SELECCIONADO. TOMADO DE HOJA DE DATOS DEL FABRICANTE.	96
TABLA 2.4 VALORES DE GRADO DE SATURACIÓN PARA DISTINTOS NIVELES DE GRADO DE SATURACIÓN. DS: MÉTODO APROXIMADO, X: MÉTODO PROPUESTO POR HCM (2000). TOMADO DE AKCELIK (2000).	100
TABLA 2.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS.....	102
TABLA 2.6 BASE DE REGLAS DIFUSAS PARA EL PORCENTAJE DE CAMBIO EN EL CICLO Y PARA LA DIVISIÓN DE FASE.	108
TABLA 2.7 RESULTADOS OBTENIDOS BAJO DISTINTOS VOLÚMENES DE TRÁFICO.	127
TABLA 2.8 CARACTERÍSTICAS DE MÓDEM GSM/GPRS SIM 800L	130
TABLA 2.9 CARACTERÍSTICAS PIC 16F88. TOMADO DE HOJA DE DATOS DEL FABRICANTE..	131
TABLA 2.10 ASIGNACIÓN DE PINES PIC 16F88.....	133

Lista de ecuaciones

Capítulo I

FÓRMULA 1.1 RELACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS VARIABLES MACROSCÓPICAS DE TRAFICO...	13
FÓRMULA 1.2 DEMORA UNIFORME CAUSADA POR COMPONENTE DETERMINÍSTICA DE LLEGADAS EN LA CORRIENTE VEHICULAR.....	16
FÓRMULA 1.3 DEMORA INCREMENTAL CAUSADA POR LA COMPONENTE ALEATORIA DE LA LLEGADA DE VEHÍCULOS	16
FÓRMULA 1.4 CAPACIDAD DE UNA INTERSECCIÓN SEMAFORIZADA	19
FÓRMULA 1.5 RELACIÓN VOLUMEN/CAPACIDAD PROPUESTO POR EL MANUAL DE CAPACIDAD DE CARRETERAS EDICIÓN 2000	19
FÓRMULA 1.6 VALOR DE DEFUSIFICACIÓN USANDO EL METODO DEL CENTROIDE.....	25
FÓRMULA 1.7 INDUCTANCIA DE UN LAZO INDUCTIVO	37
FÓRMULA 1.8 SENSIBILIDAD DE UN LAZO INDUCTIVO	39
FÓRMULA 1.9 SENSIBILIDAD DE UN LAZO INDUCTIVO FRENTE A UN VEHÍCULO	40
FÓRMULA 1.10 CONDICIÓN DE OSCILACIÓN EN UN OSCILADOR LC.....	44
FÓRMULA 1.11 FRECUENCIA DE OSCILACIÓN EN UN OSCILADOR LC	44
FÓRMULA 1.12 SENSIBILIDAD DE UN LAZO INDUCTIVO EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA DE OSCILACIÓN	44
FÓRMULA 1.13 FRECUENCIA PROMEDIO MEDIDA POR UN CONTADOR DE FRECUENCIA RECÍPROCO.....	47

Capítulo II

FÓRMULA 2.1 RESOLUCIÓN MÍNIMA PARA LA FRECUENCIA DADA UNA SENSIBILIDAD DEL DETECTOR DE LAZO INDUCTIVO	62
FÓRMULA 2.2 CALCULO APROXIMADO DEL GRADO DE SATURACIÓN A PARTIR DE VARIABLES MICROSCÓPICAS PROPUESTO POR AKCELIK (1997).....	99
FÓRMULA 2.3 VALOR DE FUSIFICACIÓN SIMPLIFICADO PARA EL CASO DE RELACIONES DIFUSAS CON CONJUNTOS SINGLETON	103
FÓRMULA 2.4 INFERENCIA DE MAMDANI CON OPERADOR “MIN”	106
FÓRMULA 2.5 VALOR DE PERTENENCIA DEL CONJUNTO U’ INFERIDO A PARTIR DE UN HECHO PARTICULAR Y UNA BASE DE REGLAS DEFINIDA	110
FÓRMULA 2.6 CALCULO SIMPLIFICADO DEL ÁREA DE LA FUNCIÓN DE PERTENENCIA INFERIDA	110
FÓRMULA 2.7 CICLO ÓPTIMO PROPUESTO POR WEBSTER EN TERMINOS DEL TIEMPO PERDIDO (ENTREVERDE), NUMERO DE FASES Y LA RELACION DEMANDA/FLUJO DE SATURACIÓN.	125

Introducción

El problema de la congestión vehicular es un asunto que recientemente ha llamado la atención de la población viajera y de las autoridades. El rápido aumento del parque vehicular agrava la situación, lo que hace necesario que las autoridades regulen tal incremento y se aseguren que las vías de tránsito tengan la capacidad de manejar el flujo vehicular. Aunque como en el caso reciente de Managua, las autoridades se avoquen mayoritariamente a entes extranjeros para la realización de tales proyectos, no quiere decir que en Nicaragua no puedan desarrollarse propuestas adecuadas para la solución de tal problemática.

Es así como decidimos investigar el fenómeno del flujo vehicular, específicamente los sistemas de control de tráfico en las intersecciones semaforizadas. Entre las diferentes opciones escogimos un escenario común en el país: una intersección aislada de cuatro accesos. El sistema fue elegido con miras en el corto y largo plazo: un control inteligente de semáforos permitiría aliviar inmediatamente la congestión vehicular y un sistema de monitoreo de flujo vehicular permitiría obtener información adecuada para la planeación de futuras estrategias que mantengan la congestión en un grado saludable.

De esta forma, desarrollamos un sistema de control inteligente basado en la lógica fuzzy que se dedica a optimizar, según sea conveniente, la demora y el número de paradas en la intersección. El sistema de monitoreo fue lanzado sobre la red GSM/GPRS para permitir al sistema conectarse *en cualquier lugar* y a un bajo costo a un centro de monitoreo y almacenamiento de datos de tráfico. El sistema de detección vehicular implementado fue desarrollado con alta confiabilidad, bajo costo y en concordancia con los parámetros necesitados por los sistemas de control y monitoreo.

Objetivos

Objetivo general

- Desarrollar un sistema electrónico para el monitoreo del flujo vehicular y control inteligente de semáforos.

Objetivos específicos

- Diseñar los subsistemas de detección vehicular, control de semáforo, y comunicación de datos.
- Verificar, mediante simulación, la efectividad de los subsistemas diseñados.
- Diseñar y ejecutar los experimentos necesarios para verificar, mediante la implementación e integración de los subsistemas, la efectividad del sistema.
- Diseñar, construir y probar los circuitos impresos de los subsistemas.
- Evaluar la efectividad del sistema de monitoreo de flujo vehicular haciendo uso de los medios disponibles.

Justificación

Como ya ha sido mencionado, el proyecto propuesto aborda una problemática de carácter nacional, urgente y que afecta severamente la calidad de vida de la población, principalmente la de los conductores de vehículos. El sistema de monitoreo del tráfico vehicular y control inteligente de semáforos propuesto tendrá la capacidad de disminuir los efectos negativos de la congestión vehicular; tiempo de espera grandes, consumo de combustible alto, niveles de estrés elevados, etc., permitiendo además que los encargados de la gestión de tránsito disminuyan sus esfuerzos y aumenten la productividad de los esquemas de gestión de tráfico a implementar. La disminución de la congestión puede traer a la vez más incentivos para la implementación de otras soluciones.

El hecho que la Alcaldía de Managua este en el proceso de instalación de “semáforos inteligentes” no disminuye la importancia de la propuesta ya que, como se mencionó antes, el llevarla a efecto permitirá desarrollar las competencias requeridas para solucionar problemas que son competencia de la ingeniería electrónica. El sistema podrá ser instalado en otras ciudades y casi seguro con una inversión menor.

Los aportes más significativos de este estudio pueden ser:

- Contribuir a la toma de conciencia sobre los efectos negativos al medio de la congestión vehicular.
- Desarrollo de competencias para solucionar problemas relacionados con el congestionamiento vehicular y disminución de la dependencia tecnológica. Mayor comprensión y experiencia alrededor de las tecnologías de supervisión de tráfico.
- Mostrar que la Universidad Nacional de Ingeniería forma profesionales competentes y comprometidos con la solución a los problemas que afectan a la sociedad nicaragüense.

Con el proyecto se desarrollará un sistema que, de manera integral, utilizará las técnicas de supervisión de tráfico más adecuadas, los esquemas de control inteligente con mejores resultados, y las tecnologías de comunicación más difundidas, con el propósito de mejorar el proceso de gestión de tráfico vehicular, mitigar los efectos de la congestión vehicular y tratar de alcanzar la vanguardia en el uso eficiente de la tecnología moderna.

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO

En este capítulo presentamos los resultados de la revisión bibliográfica alrededor del fenómeno del flujo vehicular, la temporización de las señales y las herramientas que se utilizan para la evaluación de la efectividad del sistema de control de tráfico, esto con el fin de tener una base teórica sólida que nos ayudará a determinar una metodología sistemática que converja hacia el objetivo propuesto.

1 Subsistema de control de tráfico vehicular

1.1 Introducción

El subsistema de control de tráfico vehicular es el encargado de establecer las políticas operacionales en la intersección propuesta. Éstas se establecen en términos de la temporización que el sistema de control de tráfico asigna a cada grupo de señales, y la secuencia que se debe de seguir al momento de asignar derecho de paso a cada uno de los movimientos conflictivos.

Gordon et al. (2005) describe distintos tipos de sistemas de control de tráfico, además de los criterios de selección que el diseñador debe tomar en cuenta al momento de elegir un sistema de control de tráfico. Entre los controladores que él describe figura el responsivo cuya característica principal es generar planes de temporización “on-line” para adaptarse lo más rápido posible a los cambios de flujos vehicular usando datos provenientes de sensores (p. 2-9).

Un enfoque de control responsivo es ideal para ser usado en intersecciones donde se tienen flujos de tráfico ligeramente variables ya que éste responde de forma rápida y automática a las variaciones de flujo, sin llegar a anticipar a los cambios de demanda vehicular, es decir, sin la capacidad de predecir el flujo de tráfico.

Los sistemas de control de tráfico generalmente se diseñan persiguiendo múltiples objetivos, por un lado, se desea disminuir el tiempo de espera sin comprometer la seguridad de los usuarios sobre la intersección y a la vez disminuir los impactos ambientales en términos de las emisiones contaminantes causadas por la demora

en los semáforos. Es por esta razón, que se necesitan de controladores altamente flexibles, y que además se desarrolle siguiendo un esquema multi-objetivo.

La teoría de conjuntos difusos proporciona un conjunto de herramientas que nos permite desarrollar controladores altamente flexibles y, además, debido a que el sistema se modela en términos heurísticos nos permite trasladar el conocimiento experto expresado en forma de lenguaje natural a un sistema de cómputo que es capaz de tratar la ambigüedad de manera sistemática, lo cual, facilita el desarrollo de sistemas múltiples entradas múltiples salidas (MIMO, por sus siglas en ingles), característica fundamental para el desarrollo de sistemas multi-objetivo (Anderson, Sayer, & Bell, 1998).

1.2 Operación de las señales de tráfico

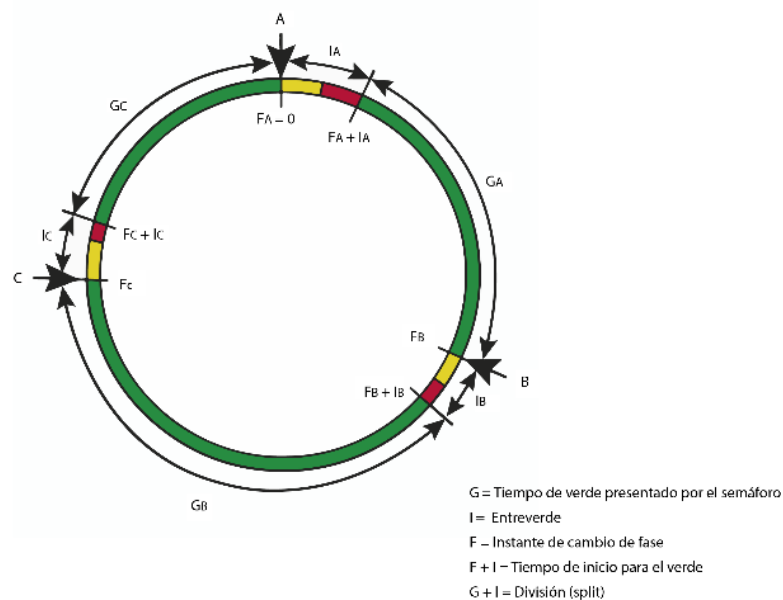
1.2.1 Parámetros de temporización

Los parámetros de temporización son conceptos fundamentales que se deben conocer al momento de referirnos a los controladores de tráfico vehicular. El control de estas variables regirá la forma en la que el automovilista se desplaza a lo largo de la intersección, además influirá en el comportamiento del flujo vehicular, parte sustancial para controladores ubicados más a lo interno de la corriente vehicular.

- Longitud del ciclo: el tiempo requerido para que se de una secuencia completa de intervalos de señales (fases).
- Fase: la porción del ciclo asignado a la combinación de uno o más movimientos para que simultáneamente tengan derecho de paso durante uno o más intervalos.
- Intervalo: una porción discreta del ciclo durante el cual las señales lumínicas permanecen sin cambio.
- División: el porcentaje de la longitud del ciclo asignado a cada una de las fases.

- Desfase: la relación temporal, expresada en segundos o en porcentaje del ciclo, determinado por la diferencia entre un punto definido de un verde coordinado y un punto de referencia en el sistema
- Entre-verde: El intervalo en el que finaliza el periodo verde para una fase e inicia la presentación del verde en la siguiente fase.
- Mínimo (máximo) tiempo verde: tiempo mínimo (máximo) para que se presente un intervalo verde.

En la figura 1.1 se ilustra los conceptos definidos anteriormente.



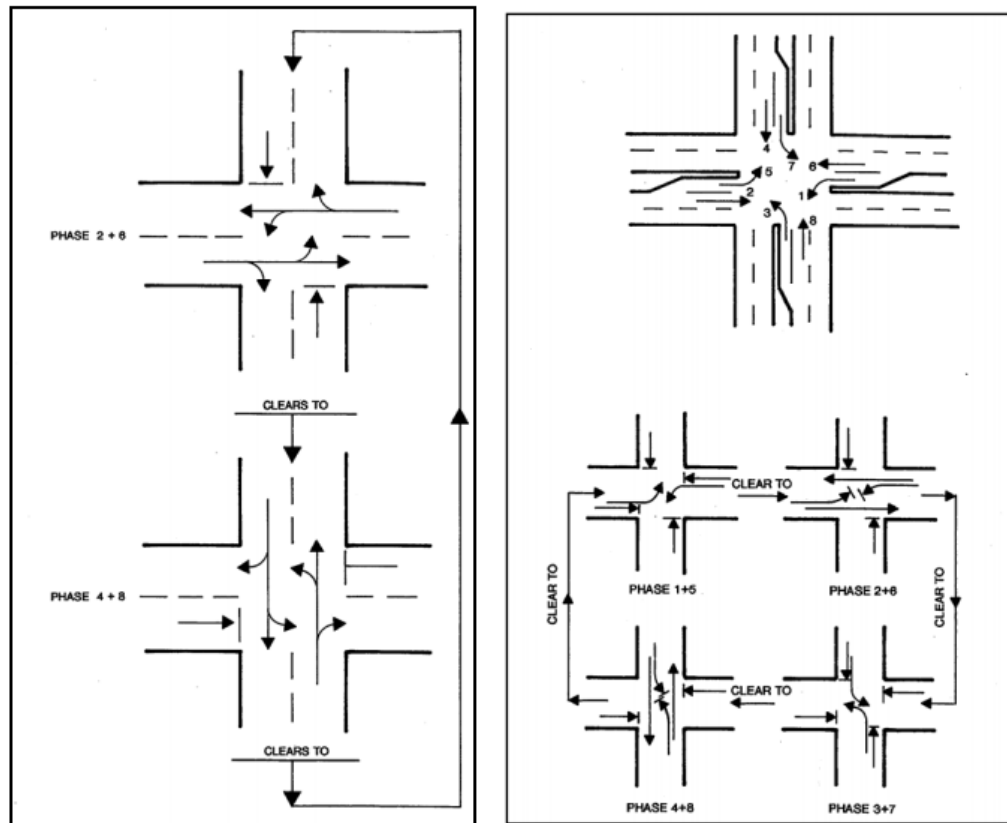
1.1 Definición de los parámetros de temporización y asignación de fase.
Adaptado de Akcelik (1978).

1.2.2 Asignación de fases

La asignación de fase reduce el conflicto entre los movimientos de una intersección señalizada. La Asociación Nacional de Fabricantes de Electricidad (NEMA, por sus siglas en inglés) ha adoptado y publicado una nomenclatura para la definición de varias fases con el fin de eliminar malos entendidos entre compradores y fabricantes (Gordon et al., 2005).

El problema de la asignación de fase se reduce a las maniobras de giros que el conductor realiza a la izquierda. En la medida que el volumen de giros a la izquierda aumenta, mayor conflicto habrá con los vehículos que se quieren desplazar hacia el frente de la intersección, lo que origina la necesidad de separar estos movimientos de tráfico con el fin de evitar colisiones (giros protegidos). La separación de los giros a la izquierda da como resultado un incremento en el número de fases como se observa en la figura 1.2.

Al incrementar el número de fase se obtiene una mejor operación de la intersección en términos de seguridad, sin embargo, este incremento en la seguridad se ve empañado por un incremento en las demoras; ya que el número de fases es mayor, el conductor se ve obligado a detenerse por mayor tiempo (incremento en la longitud del ciclo) y el tiempo perdido por cada fase incrementa (perdidas por aceleración al inicio de la indicación verde).



1.2 Izquierda: dos fases con giros a la derecha permitidos. Derecha: al proteger los giros el número de fases incrementa a cuatro. Tomado de Gordon (2005).

1.3 Sistemas de control de tráfico

1.3.1 Controlador de tiempo fijo

Los controladores de tiempo fijo se limitan a establecer una secuencia de fase fija y tiempos preestablecidos para el intervalo en el que el conductor tiene derecho de paso. El cálculo del tiempo y la secuencia de fase se realiza haciendo uso de datos históricos modales, espaciales y temporales del flujo de tráfico vehicular; el ingeniero de tráfico se encarga de planificar, diseñar e implementar un plan de secuencia de fase y temporización que se ajuste a los requerimientos establecidos. Este tipo de controlador es conveniente cuando se tienen volúmenes de tráfico predecibles y patrones de tráfico como en el área interna de la ciudad. Los controladores de tiempo fijo pueden presentar una serie de planes de temporización que son ejecutados según la hora del día o dada la ocurrencia de un evento especial, sin embargo, a pesar de dicha “flexibilidad” en sus planes, estos pueden causar demoras excesivas de vehículos donde existe un alto grado de variabilidad.

1.3.2 Controlador accionado por el tráfico

Surgen a partir de las limitaciones que presentan los controladores de tiempo fijo, esta estrategia de control hace posible identificar las ligeras variables ciclo a ciclo que se da en la corriente vehicular, incrementando o terminado el intervalo verde asignado a la fase actual. Las variaciones en el flujo vehicular se obtienen a partir de datos proporcionados por detectores de lazo inductivo generalmente ubicados a cierta distancia de la línea de parada. Los controladores actuados incluyen controladores *semi-actuados* y *completamente-actuados*.

En la operación *semi-actuada*, la calle principal tiene intervalo de tiempo verde hasta que un vehículo arriba a un acceso secundario (bajo volumen de tráfico). La señal entonces cambia a verde en el acceso secundario y permanece en ese intervalo hasta que todos los vehículos son servidos, o hasta que se alcance un umbral máximo establecido.

1.3.3 Control adaptativo al tráfico

Responde mucho mejor a las variaciones del flujo vehicular debido a las modificaciones que hacen al ciclo, desfase y offset usando datos de tráfico proporcionado por sensores ubicados en lugares estratégicos de la intersección, estos datos le permiten al sistema de control realizar predicciones sobre la demanda de tráfico para cierto intervalo de tiempo, respondiendo de forma sistemática a las variaciones aleatorias del flujo vehicular.

1.3.4 Trafico responsivo no optimizado

Gordon (2005) nos explica en detalle las generalidades de los controladores de tráfico responsivo, siendo la flexibilidad una característica deseable debido a las variaciones estocásticas del tráfico vehicular. Un sistema responsivo no optimizado usa un conjunto de reglas heurísticas para establecer una relación entre las variables de temporización en las señales de tráfico y la condición de tráfico, sin embargo, los ajustes en tiempo real no son optimizados con respecto al cumplimiento de múltiples objetivos. Entre estos sistemas tenemos:

Sistema de tráfico adaptativo coordinado de Sydney (SCATS, por sus siglas en inglés): Es un sistema jerárquico a dos niveles desarrollado en Australia por la autoridad de tráfico y carreteras (RTA, por sus siglas en inglés). SCATS usa información de sensores ubicados en la línea de parada para ajustar los parámetros de temporización de las señales. SCATS no optimiza sus parámetros en función de ninguna medida de rendimiento (Sims & Dobinson, 1979).

Técnica para la optimización de ciclo, desfase y división (SCOOT, por sus siglas en inglés): Es un sistema de control de tráfico urbano responsivo desarrollado a inicios de 1973 en Gran Bretaña por el laboratorio de investigación de transporte y carreteras (TRRL, por sus siglas en inglés). SCOOT adapta las condiciones operacionales de las señales basado en perfiles de flujo cíclico (CFP, por sus siglas en inglés) que los elabora a partir de la información recibida de sensores ubicados a cierta distancia de la línea de parada (Robertson & Bretherton, 1991).

1.4 Variables de control

1.4.1 Intersección aislada

Una intersección es aislada cuando la corriente vehicular que circula sobre esta no tiene interacción con intersecciones vecinas. En otras palabras, la intersección en cuestión está lo suficientemente alejada, de manera tal que los intervalos de llegadas (headway) no se ven influenciados por señalizaciones adyacentes y solamente son afectados por los parámetros operacionales de la misma. Es importante hacer énfasis en que los requerimientos operacionales del sistema de control están en función de la capacidad, como veremos más adelante, los intervalos de llegada y en especial la manera en cómo los vehículos llegan a la intersección es un factor que afecta la capacidad de una intersección señalizada (Gordon et al., 2005, p.3-3; HCM, 2000).

1.4.2 Flujo

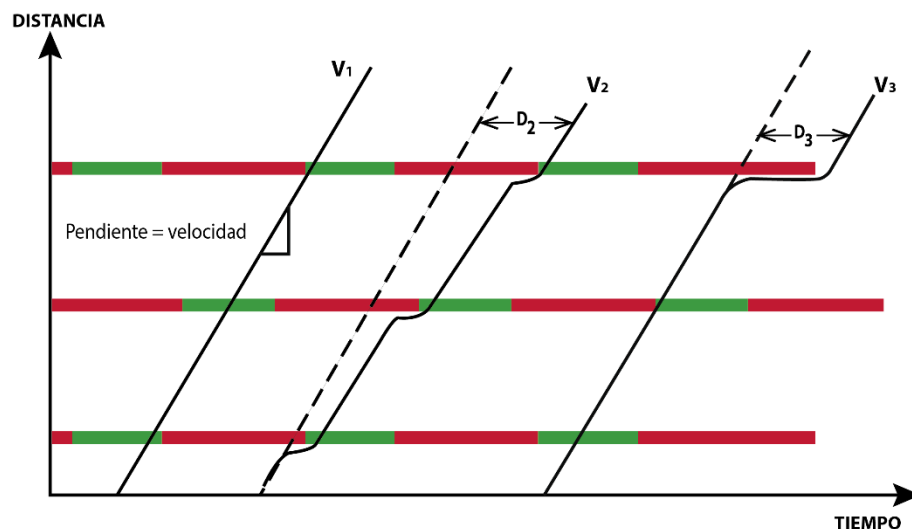
El flujo se define como el número de vehículos pasando por un punto de la carretera durante un intervalo de tiempo determinado (Gordon et al., 2005). Es considerada una variable de carácter microscópico que representa la carga de tráfico sobre el sistema de transporte y la interacción entre esta “carga” y la instalación de tráfico determina el rendimiento operacional del sistema. Se suele pensar que el flujo es equivalente a demanda, sin embargo, bajo condiciones de tráfico congestionado el flujo no es más que la cantidad de vehículos que pueden atravesar una sección de la carretera, mas no la demanda de ésta. A pesar de ello, el flujo juega un papel importante en el diseño, planificación y operación de los sistemas de transporte, por tal motivo es de gran interés conocer sus características, espaciales, temporales y modales (May, 1990, p. 54).

1.4.3 Velocidad

La velocidad es una medida fundamental para conocer el desempeño operacional de los sistemas de transporte y es definida como una razón de desplazamiento expresado como una distancia por unidad de tiempo, generalmente en kilómetros por hora (HCM, 2000, p. 7-2).

La mayoría de modelos analíticos y de simulación se interesan en el cálculo de esta variable para medir el desempeño dado el diseño, la demanda y los sistemas de control para posteriormente usarlos para obtener aproximaciones del consumo de combustible, emisiones, análisis de accidentes, ruido, etc.

En los sistemas de control adaptativo es poco usual medir directamente la velocidad ya sea de cada vehículo o el promedio dada una corriente vehicular, sin embargo, debido a la relación que esta tiene con otras variables de tráfico fundamentales, tales como la ocupación, el flujo y la densidad, es posible obtener una aproximación de esta. En la figura 1.3 la velocidad es representada por una pendiente que por motivos de análisis se presenta como constante, cuando el conductor llega a una intersección y observa un flujo de tráfico detenido está pendiente disminuye y de aquí se obtiene el concepto de demora. La línea punteada en la figura 1.3 representa la velocidad V a la que el vehículo viajaría si no se presenta ningún evento que interrumpa su trayecto, pero debido a que en intersecciones semaforizadas esto no es así, la diferencia temporal D daría como resultado un tiempo de demora causado por la reducción de la velocidad.



1.3 Diagrama espacio-tiempo ilustrando el concepto de velocidad y demora. La línea discontinua indica la velocidad de flujo libre, las caídas de pendiente indican demora.

1.4.4 Densidad

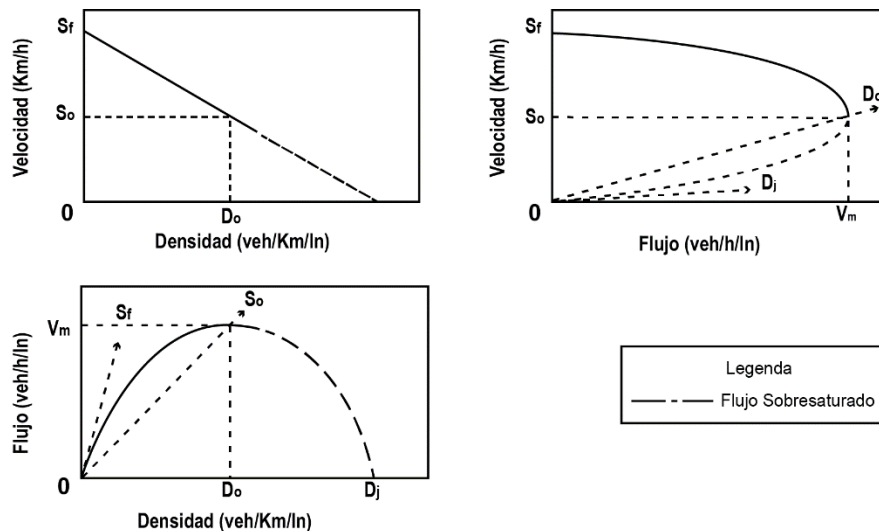
Se define la densidad como el número de vehículos ocupando una sección de la línea o autopista. La densidad por lo general es expresada como un valor promedio y es usualmente expresada como vehículos por kilómetros (veh/km) o vehículos ligeros por kilómetro por línea (pc/km/l).

La densidad es calificada como una medida macroscópica (May, 1990) y generalmente su medición es dificultosa, requiriendo en muchas ocasiones sistemas de supervisión mediante cámaras. Sin embargo, dada la relación que esta tiene con la velocidad y el flujo, denominada como la “relación fundamental del tráfico” (ver ecuación 1.1) es fácilmente medible a partir del conocimiento de la velocidad y el flujo.

Salter (1974), define esta relación mediante la siguiente ecuación (p. 126) y de forma gráfica se representa en la figura 1.4 :

Fórmula 1.1

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Velocidad media espacial}}$$



1.4 Relación fundamental de las variables fundamentales del tráfico. Adaptado de Roess (2004).

1.4.5 Capacidad

La capacidad de una intersección es definida como “la máxima tasa horaria en la cual personas o vehículos razonablemente pueden pasar por un punto o una sección uniforme de una línea o una autopista durante un periodo de tiempo dado, bajo las condiciones prevalecientes de la infraestructura vial, del tráfico, y condiciones de control” (HCM,2000, p. 2-2).

De la definición anterior podemos notar que la capacidad está en función de:

- La condición prevaleciente de la infraestructura vial: referida a las condiciones geométricas de la intersección, que inherentemente limitan la circulación de vehículos, entre estas podemos mencionar el número de líneas sobre una autopista, así como el sentido de tráfico que circula por ella, el ancho de cada carril, el gradiente, la velocidad de flujo libre, etc.
- El tráfico: la composición del tráfico afecta la capacidad de una infraestructura vial, ya que las condiciones físicas y mecánicas para diferentes automotores modificará la progresión de tráfico en términos del tiempo que éste tarda en recorrer una sección de la vía. De igual manera la distribución de tráfico determinará las características temporales de la demanda, generalmente existen modelos analíticos basado en distribuciones probabilísticas que permiten modelar para fines de planificación la llegada de vehículos.
- Dispositivos de control de tráfico: se refiere a las condiciones de control para flujo de tráfico interrumpido y no interrumpido, donde tenemos a los semáforos como elemento principal, donde sus características operacionales tienen un impacto significativo sobre la capacidad.

1.4.6 Nivel de servicio

El nivel de servicio es un concepto que fue primeramente introducido en 1965 por el manual de capacidad para las carreteras como una manera conveniente de describir en términos cualitativos la correcta operación de las instalaciones de tráfico y las condiciones de control. “El nivel de servicio (LOS, por sus siglas en

inglés) es una medida cualitativa que describe las condiciones operacionales dentro de una corriente de tráfico, generalmente en términos de medidas como la velocidad y el tiempo de viaje, libertad de maniobra, interrupciones en el tráfico, el confort y la conveniencia” (HCM,2000, p. 2-2).

Se definen seis niveles de servicios usando letras desde la A hasta la F, siendo la primera la condición de tráfico más favorable, donde se dice que el flujo es libre, en decir, existe una interacción mínima entre los automovilistas, por tanto, el conductor es libre de elegir la velocidad a la que se desplaza. Como se mencionó anteriormente, no existe un modelo analítico para la predicción precisa de una medida cualitativa en función del tipo de instalación en cuestión, por tal motivo el HCM (2000) propone una medida de efectividad asociada al tiempo de instalación en estudio, siendo de particular interés las intersecciones señalizadas cuya medida de efectividad se define en términos de la demora promedio en segundos por vehículos, como se observa en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Medida de efectividad definiendo el nivel de servicio. Tomado de HCM (2000).

Tipo de flujo	Tipo de instalación	Medida de efectividad (MOE)
Flujo no interrumpido	Autopista	Densidad (pc/mi/ln)
	Carreteras multilíneas	Densidad (pc/mi/ln)
	Carreteras con dos líneas y dos sentidos	Velocidad de viaje promedio (mi/h)
Flujo interrumpido	Intersección señalizada	Tiempo de espera (s/veh)
	Intersección no señalizada	Tiempo de espera (veh/h)
	Peatones	Espacio (ft ² /ped)
	Bicicletas	Frecuencia de eventos conflictivos (Eventos k)

1.4.7 Demora

La demora se define como el tiempo adicional que emplea un vehículo (o peatón) debido a las condiciones operacionales de la instalación de tráfico y principalmente debido a los dispositivos de control. El HCM (2010) se refiere a la demora como una medida del nivel de servicio para las condiciones de tráfico interrumpido, en particular, las intersecciones señalizadas.

Existen diferentes tipos de demoras:

Demora uniforme: en este tipo de demora se asume que la llegada de vehículos es en intervalos perfectamente uniformes, es decir, la varianza y la media de la distribución de vehículos son iguales (ver fórmula 1.2).

$$d_1 = \frac{0.5 * C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X) \frac{g}{C}\right]} \quad \text{Fórmula 1.2}$$

Donde:

d_1 = demora uniforme.

C = ciclo de tiempo.

X = grado de saturación.

g = tiempo de verde efectivo para la fase.

Demora incremental: debido a que la llegada de vehículos no es en intervalos constantes, se debe tomar en cuenta la componente aleatoria causada por las variaciones estocásticas del tráfico. La demora incremental estima el tiempo adicional debido a las llegadas no uniformes y a los ciclos fallidos (la cola no se descargó completamente), además de demora causada por periodos sostenidos de sobresaturación (ver fórmula 1.3).

$$d_2 = 900 * T \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right] \quad \text{Fórmula 1.3}$$

Donde:

d_2 = demora incremental.

c = capacidad.

T = duración del periodo de análisis.

k = Ajuste de demora incremental debido a intervalo de extensión.

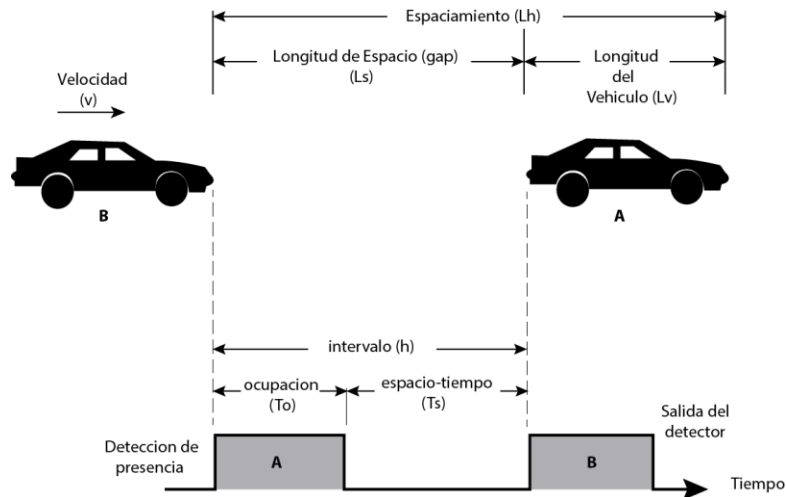
I = ajuste de demora incremental debido a la influencia señales vecinas.

Se debe tener en cuenta que para intersecciones aisladas la llegada de vehículos es considerada aleatoria, es decir, la llegada no es influenciada por intersecciones adyacentes. Las redes de transporte a lo interno de una ciudad están compuestas por intersecciones separadas por distancias muy pequeñas (grid), en este caso la llegada de vehículos se comporta como un pelotón de vehículos, y la aleatoriedad de esta es representada por un factor de dispersión del pelotón, tema que en esta tesis no es abordado (Salter, 1974; HCM,2000; Luk, 1989, p. 61).

1.4.8 Intervalo (headway)

El intervalo se refiere a la diferencia de tiempo entre vehículos que pasan por una sección de la carretera, tomando como referencia algún punto de esta. May (1990) define el intervalo como una característica del flujo que afecta el nivel de servicio, la seguridad, el comportamiento del conductor y la capacidad de los sistemas de transporte. En la figura 1.5 se puede observar el concepto descrito anteriormente además de otras variables microscópicas de tráfico.

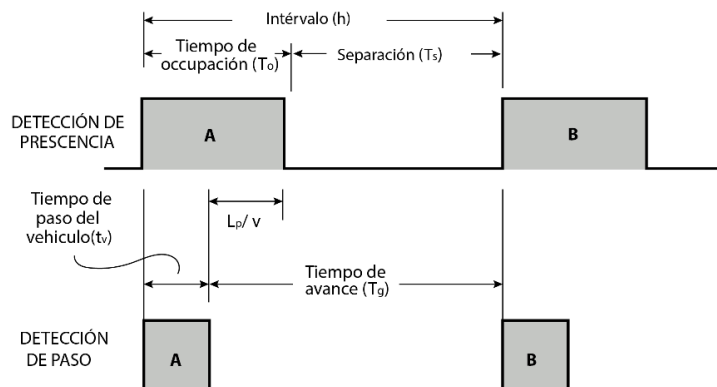
La distribución de intervalos de llegadas determina la naturaleza de la demanda, aspecto que va ligado a la temporización del ciclo, offset y fase, y por consiguiente es de vital importancia tomar en cuenta esto al momento de modelar la demanda de tráfico y el diseño del controlador de tráfico en términos de flexibilidad (Akcelik,1994).



1.5 Definición de intervalo vehicular, ocupación y espacio tiempo. Variables medidas por un lazo de inductivo de tipo presencia. Adaptado de Akcelik (2002).

1.4.9 Ocupación y espacio tiempo

La ocupación es una variable de carácter microscópico que está relacionada con la densidad de la corriente vehicular (May, 1990). Esta variable es fácilmente medible por detectores de lazo inductivo tipo presencia, y como podemos observar en la figura 1.6 está conformado por dos tiempos, el tiempo que el vehículo emplea en recorrer su propia distancia, y el tiempo que éste emplea en recorrer el lazo. Akcelik (1997) ha presentado una serie de ecuaciones que demuestran la relación que la ocupación tiene con la velocidad a la que viaja el vehículo, la composición del tráfico y la longitud del área de detección.



1.6 Salida de un detector tipo presencia y tipo paso. La ocupación en un detector tipo presencia tiene siempre un valor mayor. Adaptado de Akcelik (2002)

El espacio tiempo o separación es el tiempo que el detector de presencia está libre, es decir, no hay vehículo sobre el área de detección. Esta variable es poco mencionada en la literatura, pero Akcelik (1997) demostró que es posible medir la capacidad en función de esta variable y el flujo que circula por una intersección determinada; lo atractivo de esto, está en que esta variable es fácil de medir con lazos inductivos.

1.4.10 Grado de saturación (relación volumen/capacidad)

El HCM (2000) define el grado de saturación como una medida de la capacidad de las intersecciones señalizadas. El grado de saturación es la relación entre la tasa de flujo y el flujo de saturación. La tasa de flujo para una línea de una carretera es definida como la cantidad de vehículos que han pasado por un punto de regencia en términos del tiempo (veh/s) y la capacidad (c) y está dada por:

$$c = s * g/c \quad \text{Fórmula 1.4}$$

La capacidad está en función del flujo de saturación (s) y la porción del ciclo que se asigna a la fase (g/c) donde g es el verde efectivo para cualquiera de las fases y c es la longitud del ciclo.

El grado de saturación viene dado por la relación entre el flujo actual medido y la capacidad de la intersección (v/c).

$$X = \frac{V}{s * \frac{g}{c}} = \frac{V * C}{s * g} \quad \text{Fórmula 1.5}$$

Donde:

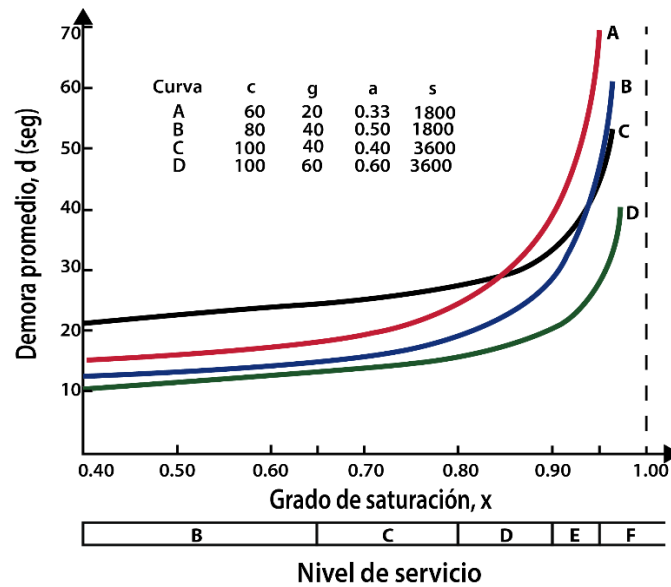
X = grado de saturación.

V = Volumen actual de vehículos.

c = Capacidad de la intersección.

g = Duración del intervalo verde para una fase

El HCM (2000) recomienda que este valor se mantenga entre un rango de 0.85-0.90 ya que valores por debajo de este indican intersecciones operando por debajo de su capacidad, es decir, tiempo de verde efectivo muy prolongados bajo situaciones de poca demanda. Por otro lado, valores por encima de 0.9 indican condiciones de sobre saturación. Esto se puede observar en la figura 1.7.



1.7 Demora promedio en función del grado de saturación y el nivel de servicio.
Adaptado de Akcelik (1978).

1.5 Sistemas de control

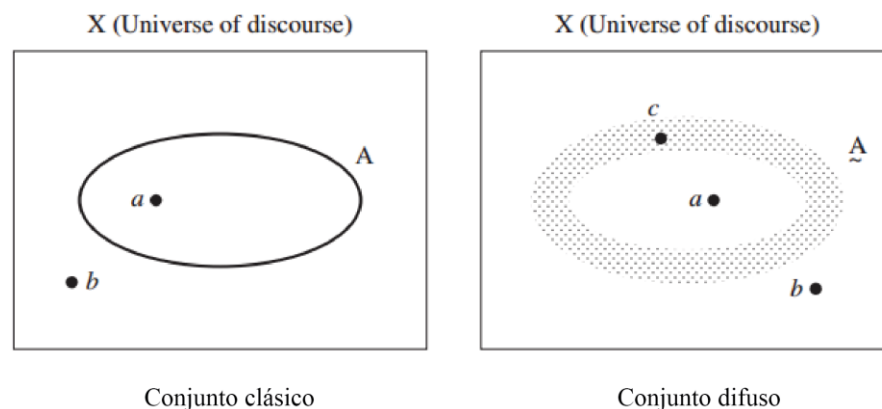
1.5.1 Lógica difusa

La lógica difusa es una extensión de la lógica tradicional propuesta de manera formal en 1965 por el profesor Lotfi Zadeh en su artículo científico “fuzzy sets” donde plantea las propiedades de los conjuntos difusos y propone el concepto de función de pertenencia como una manera de caracterizar la naturaleza con la que el ser humano describe su entorno. Zadeh (1965) describe en su artículo científico las propiedades fundamentales de los conjuntos difusos y remarca los inconvenientes de la lógica clásica en la descripción de fenómenos complejos; él clasifica su nuevo enfoque como una extensión de la lógica clásica. Las propiedades y operaciones de los conjuntos difusos tales como la unión, la intersección, la negación, etc., son aplicables para los conjuntos difusos, aunque de una manera general, de igual manera las propiedades conmutativa, asociativa, distributiva son aplicables a los conjuntos difusos con la salvedad de la ley de no contradicción y la ley del medio excluido, las cuales en la lógica clásica nos limitan a asignar valores de pertenencia entre cero y uno a un elemento, descartando la posibilidad de describir pertenencias parciales, como si lo hace la lógica difusa.

La posibilidad de asignar pertenencias parciales sobre los elementos de un conjunto hace que la lógica difusa sea capaz de describir de una manera más conveniente procesos complejos, donde, aunque no sabemos los procesos físicos que intervienen, somos capaces de interactuar con ellos y lograr resultados aceptables. Haciendo uso de la lógica difusa podemos aproximar una función algebraica mediante proposiciones lingüísticas, lo que convierte a la lógica difusa una herramienta de aproximación universal. Pero sin duda lo más atractivo de la lógica difusa está en el hecho que es capaz de modelar un sistema cuyo proceso físico es totalmente desconocido, a través de una serie de implicaciones entre acciones y conclusiones expresadas en lenguaje natural. De ahí, los sistemas difusos tienen un alto potencial para tratar con sistemas que carecen de formulaciones analíticas: sistemas complejos (Ross, 2010).

1.5.2 Conjuntos difusos y variable lingüística

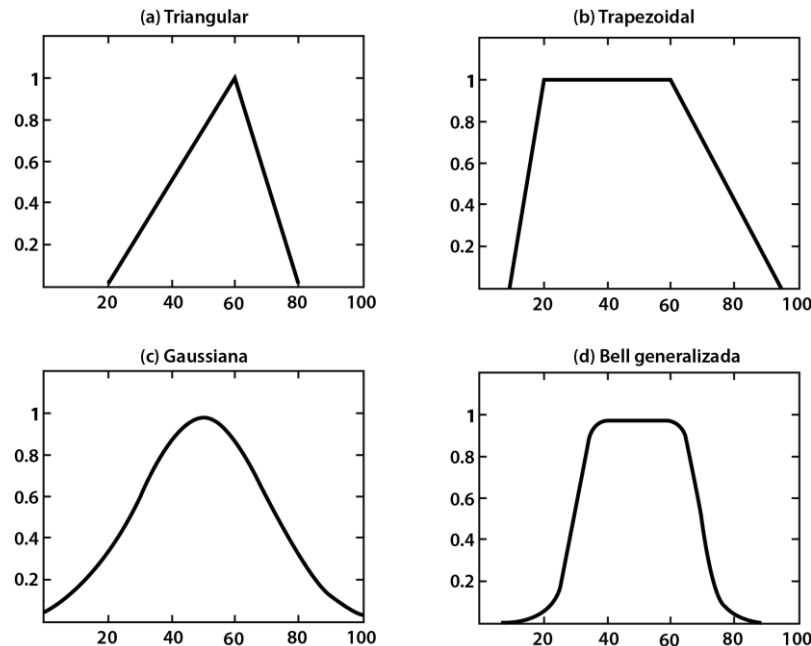
Un conjunto difuso es una colección de elementos con un grado de pertenencia continuo. Tal conjunto es caracterizado por una función de pertenencia la cual asigna a cada elemento un grado de pertenencia en un rango de cero a uno. Zadeh (1995) explica que los conjuntos difusos son capaces de representar la naturaleza ambigua del mundo real. Un conjunto difuso puede ser visto como una extensión del concepto de conjunto clásico, en el cual sus elementos solo toman valores de “0” y “1”, en la figura 1.8 podemos observar que el elemento a pertenece al conjunto A , mientras que elemento b no pertenece, por otro lado, en el caso del conjunto difuso lo anterior es válido, pero se define un nuevo elemento c el cual tiene una pertenencia ambigua al conjunto A (pertenencia no es ni cero ni uno, es un valor entre estos dos límites). Las propiedades de los conjuntos clásicos, así como sus operaciones son ampliamente abordadas en la literatura, por tal motivo, en resumen, podemos decir que todas las propiedades y operaciones de los conjuntos clásicos son aplicables a los conjuntos difusos, con la salvedad de la ley de no contradicción y la ley del medio excluido (Jang, Sun, & Mizutani, 1997).



1.8 Diferencia entre conjunto clásico y conjunto difuso. Tomado de Ross (2010).

La función de pertenencia es una función matemática que asigna a cada elemento de un conjunto el grado de pertenencia del elemento x a un conjunto definido sobre un universo de discurso, comprendido por todos los elementos posibles. El

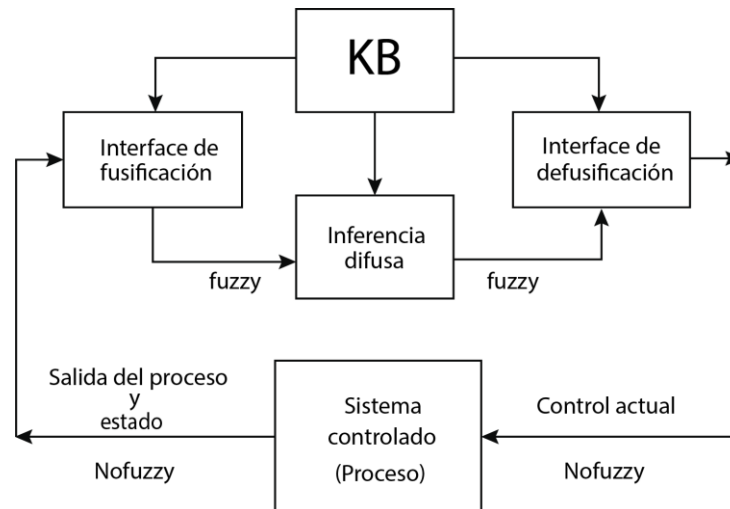
universo discurso puede estar conformado por varios conjuntos difusos que determinará el valor lingüístico al cual el valor x pertenece, así, un elemento puede pertenecer en distintos grados a diferentes conjuntos. En la figura 1.9 podemos observar distintas funciones para evaluar la pertenencia de un elemento a un conjunto, la más usada son las funciones trapezoidales y triangulares debido a su bajo requerimiento computacional (Jan et al., 1997, p. 24).



1.9 Tipos de funciones de pertenencia. (captura de pantalla)

1.5.3 Control difuso

Un controlador lógico difuso (FLC, por sus siglas en inglés) es un regulador no lineal que hace uso de la teoría de conjuntos difusos para modelar de manera heurística el comportamiento dinámico de un sistema. La función principal del controlador, es proporcionar un algoritmo el cual pueda convertir una estrategia de control lingüístico basado en el conocimiento experto en una estrategia de control automático. Mamdani (1994) fue el primero en utilizar el concepto previamente definido para controlar una planta, construyendo el primer controlador difuso el cual se conoce hoy en día como “controlador Mamdani” debido a la arquitectura y la estructura de la base de reglas. La arquitectura de un controlador difuso tiempo Mamdani se puede observar en la figura 1.10.



1.10 Configuración básica de un controlador difuso tiempo Mamdani

El controlador difuso está formado por:

Interfaz de fusificación: es la encargada de convertir los valores crisp provenientes de los elementos de medición a su valor lingüístico equivalente. En implementaciones digitales por lo general los datos de entrada primeramente son normalizados y luego son discretizados con el fin de reducir los costos computacionales (Patyra & Mlynek, 1996).

Base de conocimiento: contiene la definición de cada una de las funciones de pertenencia, el universo discurso sobre la que están definidas y la etiqueta lingüística de cada uno de los conjuntos difusos de entrada y salida. También contiene la modelación heurística del conocimiento experto en forma de reglas difusas. En controladores tipo Mamdani se tiene una colección de reglas que expresan de manera lingüística la causalidad entre las variables de entrada y salida, estas reglas son del tipo “*si A entonces B*”.

Mecanismo de inferencia: Es el encargado de seleccionar el conjunto de reglas que se han activado dada las condiciones de entrada del sistema, su principal función es la de simular el proceso de decisión humana basado en los conceptos difusos y la acción de control inferida. Su salida es la unión de todos los conjuntos implicados.

Defusificación: la defusificación es el proceso inverso a la fusificación. Debido a que la salida del sistema de inferencia es un conjunto difuso es necesario convertirlo a una forma “crisp” cuyo valor represente en una forma cualitativa la conclusión inferida. En la literatura se definen 7 métodos para la defusificación: centro de gravedad (COG, por sus siglas en inglés), máxima pertenencia, media de los máximos, promedio ponderado, suma de los centros, máxima área y el primero o último de los máximos (Cox,1994; Patyra & Mlynek,1996, p.149; Mahdiani,2013).

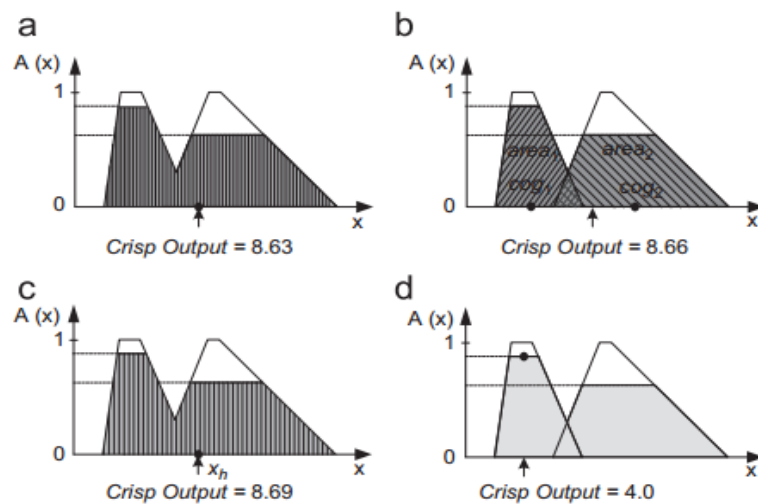
El método del centroide es ampliamente usado en las aplicaciones de control debido a la superficie de control resultante presenta transiciones suaves a las variaciones en la entrada del sistema. el valor Z^* denominado valor crisp se obtiene mediante:

$$Z^* = \int \frac{\mu_c(Z)Z dZ}{\mu_c(Z)} \quad \text{Fórmula 1.6}$$

Donde:

$\mu_c(Z)$ = Valor de pertenencia del conjunto difuso inferido (ver área sombreada en la figura 1.11).

Z = altura del conjunto difuso inferido.



1.11 Representación de algunos métodos de defusificación: a) COG, b) Suma de los centros, c) Promedio ponderado, d) Media de los máximos.

1.6 Simuladores de tráfico vehicular

Un simulador de tráfico es una herramienta que permite modelar el comportamiento del flujo vehicular siguiendo un esquema analítico mediante el empleo de las matemáticas y las leyes de la física se muestra el comportamiento de la corriente vehicular. Por la complejidad que supone modelar este fenómeno, generalmente se requiere de procesos iterativos y por ende equipos computacionales potentes para obtener resultados.

Desde los años noventa, los simuladores son programas desarrollados en ambientes gráficos que tratan de mostrar el comportamiento vehicular en una red de transporte. Generalmente estos modelos son desarrollados siguiendo modelos matemáticos cuyos estudios aún continúan. Entre estos modelos tenemos la teoría fundamental de tráfico para modelos macros y el modelo de seguimiento de vehículos (car-following) usado en una gran cantidad de simuladores microscópicos tanto comerciales como de código abierto.

De acuerdo al nivel detalle con que se analiza la red de transporte, se puede clasificar en: modelos de simulación macroscópico, microscópico y mesoscópico, además de modelos híbridos entre los enfoques mencionados.

1.6.1 Utilidad de la simulación de tráfico

La mayoría de las veces es peligroso y a veces imposible, realizar experimentos con los sistemas de transporte reales. Para las simulaciones iterativas ciertas pruebas experimentales requerirán de prototipos costosos, que incluso podrían destruirse al momento del experimento, especialmente en el caso donde el resultado del experimento es incierto.

La simulación de tráfico es por lo general más barata y permite modelar casi cualquier escenario las veces que sea posible, haciendo muchísimo más fácil comprobar la robustez de los sistemas encargados de la toma de decisiones para la gestión de tráfico, sin comprometer la seguridad de los usuarios sobre las autopistas.

Las realizaciones de pruebas de campo con respecto a la simulación por lo general son:

- Costosas: se necesita tener un equipo especializado de gente realizando pruebas y mediciones por días o semanas.
- Engorroso: hay que llevar un recuento detallado de datos estadísticos que por lo general son recolectados de forma manual. Además, la investigación bajo situaciones especiales tal como la influencia del clima, congestión de una o varias vías de acceso, accidentes, obras civiles, etc., obligan a retrasar el avance de las pruebas hasta que se den las condiciones que se requieren.
- Problemático: ciertas variables son difíciles de medir, como por ejemplo la velocidad, el tiempo promedio de viaje, las demoras, etc.
- Peligroso: el nivel de desconocimiento de la vía por la que se circula, causada por un cambio de política en la gestión resulta ser a priori muy confusa, por lo que es probable que el conductor no sea capaz de adaptarse de manera segura a estos cambios causando una mayor accidentalidad en la vía sobre la que se aplica una nueva política de control.

Debido a lo anterior hoy en día la simulación de tráfico es una herramienta de mucha utilidad para probar cambios en las políticas de control al momento de aplicar un nuevo algoritmo para control de tráfico, sin que este cause impactos adversos.

1.6.2 Modelos de simulación macroscópica

Son herramientas utilizadas para simular a nivel macroscópico la interacción entre los diferentes elementos que conforman el transporte público y privado del tránsito vehicular. Debido a su enfoque de análisis, utilizan valores promedios de velocidad, tiempo de viaje, flujo y densidad.

El comportamiento de vehículos en macro simuladores es semejante a los modelos de dinámica de fluido y cinética de gases. Ambos modelos consideran la

corriente vehicular como un flujo continuo de vehículos que se desplazan sin detenerse por intersecciones.

Este tipo de simuladores hacen uso de la demanda de transporte y la red vial disponible para poder modelar el tránsito. La demanda de transporte es obtenida de matrices de origen – destino que son proporcionadas por alcaldías o distintas entidades que se encargan de estudiar el tráfico y la red vial constituye el escenario estático sobre el que se desplazarán los vehículos (calles, carreteras, nodos, reglas de paso).

Estos simuladores brindan un amplio panorama de la posible implementación de un sistema de transporte o una modificación a un sistema existente; con esto las instituciones pueden desarrollar planes estratégicos y realizar diversos estudios de factibilidad en cuanto a la implementación de infraestructuras viales. Alguno de los simuladores macroscópicos más usados por la comunidad son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1.2 Simuladores de tráfico macroscópico.

Simulador	País de origen	Aplicación
TRANSYT-7F	Federal Highway Administration, EEUU	Redes de tráfico señalizadas
TRANSYT-15.1	Transportation Research Board, UK	Redes de tráfico señalizadas
VISUM	Universidad de Karlsruhe, Alemania	Integrado
PASSER	Instituto de Transporte de Texas, EEUU	Redes señalizadas
FRETFO	Federal Highway Administration, EEUU	Autopistas

1.6.3 Modelos de simulación microscópicos

Los simuladores de tráfico microscópicos modelan a detalle las interacciones de los elementos que componen una red de transporte, es decir, simulan el comportamiento de vehículos de forma individual y algunos son capaces de simular el comportamiento de peatones como es el caso de Vissim.

Generalmente los simuladores de tráfico microscópico basan su algoritmo en modelos de seguimiento de vehículos (car-following), cambios de carril, maniobras de adelantamiento y modelo de conductor inteligente actualmente usado en pro Vissim. No es recomendable usar este tipo de simulación para redes muy extensas ya que computacionalmente puede ser costosa. En la tabla 1.3 se presenta una lista de los simuladores microscópicos más usados.

Tabla 1.3 Simuladores de tráfico vehicular microscópicos

Simulador	País de origen	Aplicación
PARAMICS	The Edinburgh Parallel Computing Centre and Quadstone Ltd., UK	Integrado
SIMTRAFFIC	Compañía de Software para señales de tráfico, EEUU	Redes de tráfico señalizadas
VISSIM 7	Universidad de Karlsruhe, Alemania	Integrado
SUMO	Instituto de Sistemas de Transporte, Alemania	Integrado
MITSIM	Instituto de Tecnología de Massachusetts, EEUU	Integrado
HUTSIM	Universidad de tecnología de Helsinki, Finlandia	Integrado

1.6.4 Simulación de movilidad urbana (SUMO)

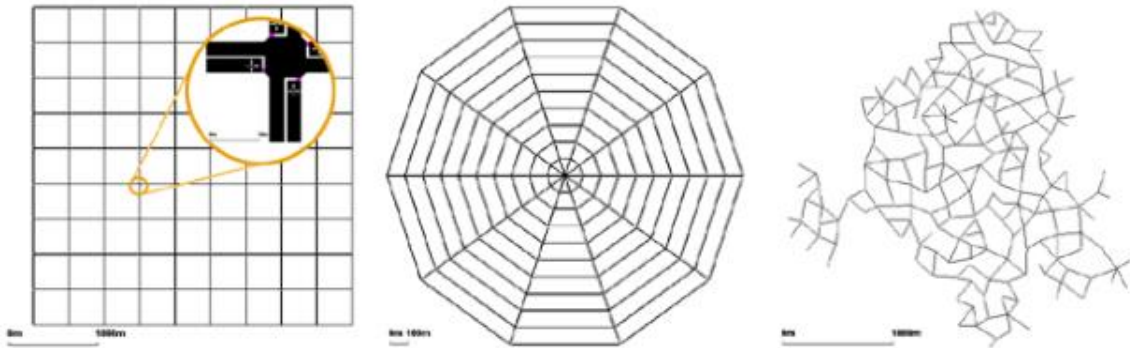
Simulación de movilidad urbana (SUMO, por sus siglas en inglés) es un simulador de tráfico microscópico, multimodal, continuo en tiempo y discreto en espacio (Krajzewicz et al., 2012). La implementación de SUMO inició en 2001 y fue lanzado como un programa de código abierto en 2002. Fueron dos las razones por la hacer de SUMO un simulador de plataforma abierta, la primera fue el deseo de apoyar a la comunidad de simulación de tráfico con una herramienta dentro de la cual sus algoritmos puedan ser implementados. Aunque existen otros simuladores de tráfico de código abierto, principalmente implementado dentro de algunas tesis, estos luego dejan de recibir soporte. El principal inconveniente de esto, además de la “reinención de la rueda” es que por lo general no existe una equivalencia entre los modelos y algoritmos implementados, por tal razón se pensó que una plataforma de simulación común resultaría muy beneficiosa. La segunda razón de hacer una plataforma de simulación de código abierto fue el deseo de ganar soporte por parte de otras comunidades e instituciones interesados en temas de transporte vial.

SUMO está compuesto por un conjunto de aplicaciones, las cuales ayudan a preparar y realizar el escenario de simulación de tráfico y las divide según su propósito en: aplicaciones de generación de carreteras, generación de demanda y simulación.

Las aplicaciones de generación de carreteras son las encargadas de generar las calles e intersecciones, así como las diferentes particularidades geométricas tal como el número de líneas, el ancho, velocidad máxima permitida y las conexiones correspondientes a los movimientos permitidos en la red. Entre estas aplicaciones tenemos:

- **NETCONVERT:** convierte redes de tráfico generadas por otros simuladores de tráfico como VISUM, VISSIM, MATSIM en un formato que es capaz de ser cargado al simulador. Además de estos formatos, netconvert es capaz de leer formatos provenientes de OpenStreetMap.

- NETGENATE: Se encarga de generar redes abstractas en forma de grilla, tela de araña y aleatorias como se muestra en la figura 1.12.



1.12 Ejemplo de redes abstractas construidas usando “netgenerate”; de izquierda a derecha: grillada, tela de araña, aleatoria.

Las aplicaciones de generación de demanda se encargan de establecer las propiedades físicas que debe cumplir cada vehículo que se moviliza por la red, además de la distribución probabilística de la llegada de vehículos.

- OD2TRIPS: Por lo general las instituciones de tráfico de una ciudad contienen la información de las rutas en forma de su origen y el destino en forma de matrices. Estas matrices pueden ser introducidas y OD2TRIPS se encarga de convertirlas a un formato que SUMO pueda interpretar.
- JRROUTER: Generador de rutas basado en la frecuencia con la que los vehículos deciden realizar una maniobra de giro.
- DUAROUTER: Utiliza un algoritmo basado en una función de costo con el fin de asignar de forma dinámica una ruta para cada usuario en el escenario de tráfico.
- DFROUTER: Mediante el uso de lazo inductivos se generan las rutas para los diferentes tipos de vehículos.

También es posible configurar el comportamiento de cada vehículo sobre la red de forma manual, es decir, escribiendo el archivo.rou.xml siguiendo la sintaxis propuesta por los desarrolladores en la página web del simulador.

1.6.5 Hardware-In-The-Loop

Los simuladores de tráfico facilitan el diseño, implementación y evaluación de los sistemas de transporte mediante la construcción de un escenario estático y uno dinámico, ambos escenarios interactúan con los dispositivos de control de tráfico. En el contexto de la simulación de tráfico, el controlador de señales de tráfico se emula siguiendo las características proporcionadas por distintos fabricantes de controladores de tráfico. Sin embargo, muchas veces algunas características avanzadas de estos controladores no pueden ser emuladas, por lo que es necesario estar consciente que los resultados obtenidos con el sistema de control modelado pueden diferir con los que obtengan de las pruebas de campo.

El término Hardware-in-the-loop (HIL, por sus siglas en inglés) se refiere a una simulación por computadora en el cual algunos de los componentes de la simulación se han reemplazado por elementos de hardware existentes. En el caso de la simulación de tráfico, el controlador de señales emulado puede ser reemplazado por un elemento de hardware desarrollado, lo que incrementaría el realismo de la simulación y proporciona acceso a las diferentes características del controlador que no estarían disponibles si tratáramos de emularlo dentro del simulador de tráfico (Engelbrecht, 2001). El esquema HIL es representado en la figura 1.13, donde observamos que la planta es simulada por computadora y esta se comunica con un dispositivo de hardware externo que mediante una serie de librerías logra intercambiar información sobre la toma de decisiones (hardware) y el estado de la intersección (software).



1.13 Flujo de datos entre la planta simulada y el controlador. (Captura de pantalla)

Dentro de las ventajas que proporciona una simulación Hardware-in-the-loop tenemos:

- Agrega realismo a la simulación dado que controlador físico es usado en lugar de uno emulado.
- Permite probar y usar estrategias de control avanzadas.
- Permite a técnicos e ingenieros configurar ciertas funciones de un controlador de tráfico de manera segura antes de ser implementadas en el campo. De esta manera, los errores pueden ser identificados de antemano, resultando en una mejora en las operaciones de tráfico y el incremento de la seguridad.

Algunas desventajas de la simulación Hardware-in-the-loop:

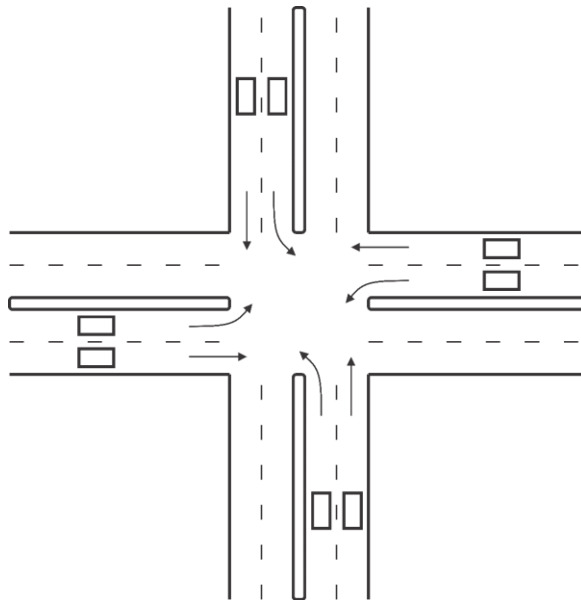
- El software de simulación de la planta puede ejecutarse mucho más rápido que el tiempo real (un segundo en el modelo, es un segundo en la realidad), especialmente sobre computadoras muy rápidas y pequeños modelos. Ya que HIL se ejecuta en tiempo real es mucho más lento que la simulación de tráfico regular, tomando más tiempo realizar procesos iterativos en la prueba del desempeño del sistema completo.
- Al incrementar la complejidad de la planta se requiere computadoras más potentes para asegurar que la simulación se ejecute en tiempo real.
- La cantidad de controladores físicos están limitadas por el número de entradas-salidas del computador que ejecuta la simulación de la planta.

1.7 Subsistema de detección vehicular

El subsistema de detección vehicular es el sistema encargado de recolectar, procesar y transmitir las variables de tráfico vehicular necesarias para el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo y control de semáforos. Estas variables fueron discutidas en la sección 1.4, entre las cuales se determinó que la ocupación, el espacio-tiempo y el flujo vehicular permitirían el funcionamiento adecuado de los subsistemas de control y monitoreo de tráfico vehicular. Un sistema de detección vehicular se encuentra conformado por sensores de flujo de

tráfico desplegados sobre las vías de tránsito de manera que permitan recolectar datos de tráfico útiles a los objetivos de los métodos de gestión de tráfico. Tales métodos de gestión hacen uso de la teoría de flujo de tráfico vehicular para determinar la localización óptima de estos sensores.

En una intersección de tráfico semaforizada los sensores pueden ser colocados: a una cierta distancia antes de la línea de parada, en la línea de parada o a cierta distancia después de la línea de parada. En la figura 1.14 se muestran detectores de lazo inductivo ubicados a una distancia antes de la línea de parada. Las características de los sensores de flujo de tráfico utilizados también influye a la hora de su instalación en las vías de tránsito; como veremos a continuación existe una variedad de detectores para diferentes objetivos de monitoreo y control vehicular.



1.14 Lazos inductivos desplegados en una intersección semaforizada.

1.8 Sensores de flujo de tráfico

Un sensor de flujo de tráfico es definido por Klein (2006) como un dispositivo que indica la presencia o paso de vehículos proveyendo información que ayude a los métodos de gestión del tráfico vehicular. Estos pueden ser clasificados según el lugar de su instalación con respecto a las vías de tránsito: los sensores intrusivos

se instalan propiamente en las vías de tráfico vehicular y generalmente requieren mayores tiempos de cierre de las vías para su instalación; los sensores no intrusivos se instalan al lado o encima del tráfico vehicular, requiriendo menor tiempo de cierre de las vías.

Los sensores intrusivos son generalmente más robustos en el proceso de detección al estar más cerca de los vehículos, lo que a la vez los hace más vulnerables a las inclemencias del tráfico (la vibración del paso de los vehículos, la expansión y contracción del pavimento o asfalto, entre otros). Los sensores no intrusivos son menos susceptibles a las inclemencias del tráfico, pero más susceptibles a las irrupciones del clima; generalmente son capaces de monitorear mayores segmentos de las vías de tránsito por equipo y de brindar datos de tráfico no disponibles a los sensores intrusivos.

La tabla 1.4 compara los sensores de flujo de tráfico comerciales más utilizados en los Estados Unidos en 2006.

*Tabla 1.4 Características de los sensores de flujo de tráfico comercialmente disponibles.
Adaptado de Klein (2006)*

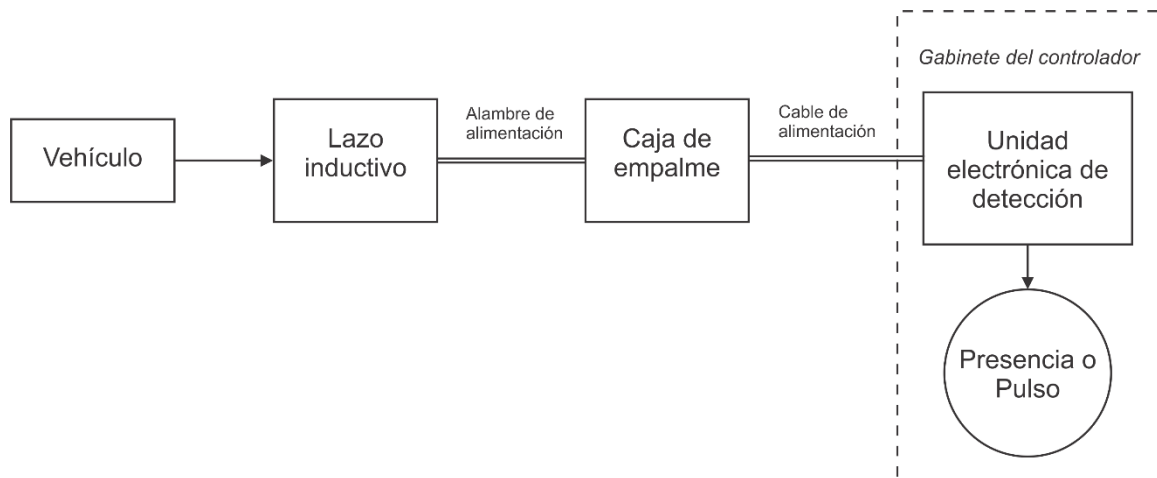
Sensor	Conteo	Presencia	Velocidad	Clasificación	Múltiples zonas de detección	Costo de compra
Lazo inductivo	Ok	Ok	Ok, bajo condiciones	Ok, bajo condiciones	N/A	Bajo
Magnetómetro	Ok	Ok	Ok, bajo condiciones	N/A	N/A	Moderado
Bobina de inducción	Ok	Ok, bajo condiciones	Ok, bajo condiciones	N/A	N/A	Bajo a moderado
Radar microondas	Ok	Ok, bajo condiciones	Ok	Ok, bajo condiciones	Ok, bajo condiciones	Bajo a moderado
Infrarrojo activo	Ok	Ok	Ok, bajo condiciones	Ok	Ok	Moderado a alto

Infrarrojo pasivo	Ok	Ok	Ok, bajo condiciones	N/A	N/A	Bajo a moderado
Ultrasónico	Ok	Ok	N/A	N/A	N/A	Bajo a moderado
Arreglo acústico	Ok	Ok	Ok	N/A	Ok, bajo condiciones	Moderado
Procesador de imágenes de video	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Moderado a alto

Klein (2006) explica que en el proceso de selección de un sensor de flujo de tráfico se deben tomar en cuenta los siguientes factores: los datos de tráfico a recolectar, la exactitud con que deben ser recolectados estos datos, el área de detección, es decir, el área en la que un vehículo puede ser detectado confiablemente, los medios de transmisión de datos apropiados, los costos de instalación y mantenimiento del sensor, así como otros requerimientos específicos al esquema de gestión de tráfico a implementar. Los primeros tres factores dependen casi exclusivamente del esquema de gestión de tráfico a implementar. Los últimos quedan determinados mayormente por los recursos disponibles por la autoridad de tránsito.

1.9 Detector de lazo inductivo

Los detectores de lazo inductivo detectan la presencia de un objeto metálico conductor al inducir corrientes eléctricas en el objeto. Según Klein (2006), estos consisten de cuatro partes: un lazo de alambre con una o más vueltas de alambre embebido en el pavimento, un alambre de alimentación que conecta el lazo de alambre a una caja de empalme, un cable de alimentación que conecta el alambre de alimentación al controlador, y una unidad electrónica albergada en el gabinete del controlador tal como lo muestra la figura 1.15.



1.15 Detector de lazo inductivo. Tomado de Klein (2006)

Este esquema tiene mayor utilidad en cuanto al proceso de instalación del detector; en cuanto a su diseño, un esquema similar al de los sistemas de medición electrónicos es más adecuado (ver sección 1.11). En tal esquema, por ejemplo, el lazo, el alambre y el cable de alimentación se reducen a un solo inductor de inductancia, capacitancia y resistencias conocidas.

El área de detección es definida como la zona donde un vehículo puede ser detectado confiablemente por el sensor de tráfico. En un detector de lazo inductivo esta depende del sistema completo y del área donde se encuentra instalado el lazo inductivo; esto se explicará con detalle en la sección 1.11.1. Un detector permanente es aquel que normalmente se utilizará más de unas cuantas horas o días en una determinada localidad de las vías de tránsito; estos se utilizan por ejemplo en los sistemas de conteo de tráfico vehicular y control de semáforos. Un detector temporal es aquel que no se utilizará por más que unos días, y se utilizan en sistemas portables donde se dedican a recolectar interrupciones especiales del tráfico vehicular tales como desviaciones por trabajos en las vías o eventos deportivos cerca de una avenida transitada. Los lazos inductivos pueden ser utilizados para detectar: todo tipo de vehículos circulando las vías de tránsito, vehículos circulando bajo condiciones especiales de tráfico (transporte pesado, zona del dilema), vehículos no convencionales (motocicletas pequeñas, bicicletas), vehículos de prioridad especial (ambulancia, policía, bomberos).

Algunos detectores de lazo inductivo son diseñados exclusivamente para cumplir los requerimientos de detección de variables de tráfico como la velocidad, la densidad y el tipo de vehículo (clasificación de vehículos). Otros poseen unidades electrónicas capaces de proporcionar características adicionales que mejoren o complementen el proceso de detección: cambio de sensibilidad de detección, cambio de frecuencia, tipo de detección, detección y envío de errores.

1.10 Modelo de detección vehicular

El proceso de detección de un detector de lazo inductivo comienza con la circulación de una corriente variable a través del lazo inductivo y la subsiguiente generación de un campo magnético variable alrededor de éste. El lazo inductivo no es más que una bobina corta cuya inductancia se calcula de manera similar a las bobinas normales con la adición de un factor que compensa el flujo magnético no uniforme, como se muestra en la fórmula 1.7.

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A F'}{l} \quad \text{Fórmula 1.7}$$

Dónde:

L = Inductancia del lazo.

μ_r = Permeabilidad relativa del medio.

μ_0 = Permeabilidad en el espacio vacío.

N = Número de vueltas.

A = Área de la sección cruzada del lazo.

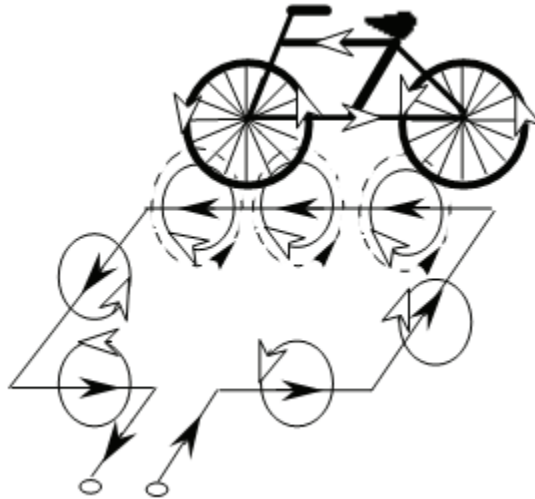
F' = Factor de compensación por el flujo magnético no uniforme del lazo.

l = Longitud del lazo.

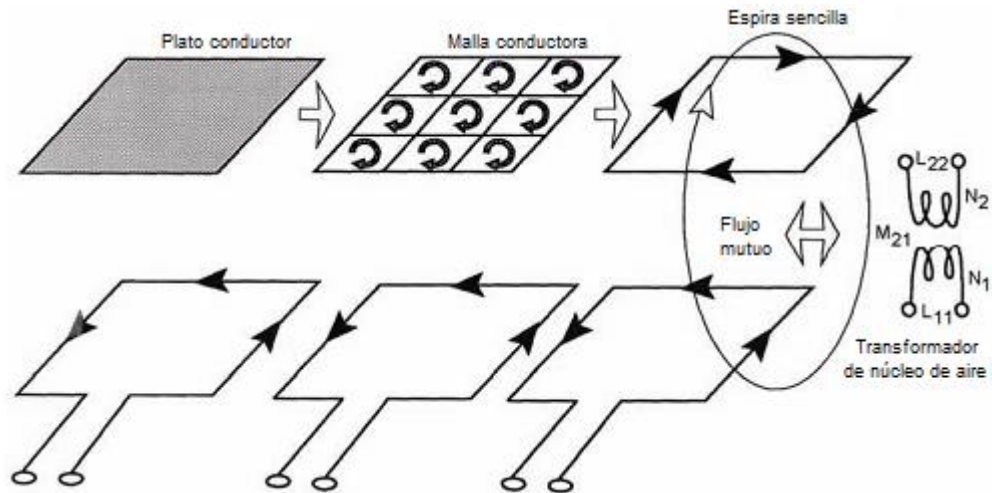
Las corrientes variables aplicadas al lazo provienen de la unidad electrónica de detección y pasan a través de los ya mencionados cables de alimentación, los

cuales son modelados como inductancias en serie para determinar el grado de desensibilización que estos producen en el proceso de detección; esto será examinado en la sección 1.11.1. Las corrientes variables se usan con el fin de garantizar campos magnéticos variables alrededor del lazo inductivo, condición necesaria para la aparición de las corrientes de Eddy; éstas una vez inducidas en la carrocería de un vehículo producen a su vez un campo magnético similar al del lazo, pero en sentido opuesto, disminuyendo la magnitud del campo magnético del lazo y por tanto la inductancia del mismo. Ciertos componentes de los vehículos (como el motor) contienen metales ferrosos que facilitan la circulación de flujos magnéticos produciendo un efecto contrario al de las corrientes de Eddy incrementando la inductancia del lazo; sin embargo, el efecto de las corrientes de Eddy que abarca toda la carrocería se superpone al efecto de los objetos ferrosos del vehículo resultando una disminución neta de la inductancia del lazo.

Las corrientes de Eddy siguen un patrón “circular” similar al de las corrientes que circulan el lazo inductivo, tal como se ilustra en las figuras 1.16 y 1.17. En el primer caso, cuando una motocicleta o vehículo similar pasa por encima del lazo las corrientes circulan de manera vertical a través de los rines y el marco de la motocicleta. Cuando tales vehículos circulan directamente sobre el alambre del lazo, el flujo magnético atraviesa el vehículo con mayor magnitud, lo que a la vez produce un mayor decremento en la inductancia del lazo. En el segundo caso, la carrocería de la mayoría de vehículos es modelada como un plano metálico horizontal donde las corrientes circulan de manera similar a la del lazo inductivo. En este caso, la inductancia del lazo disminuye con mayor auge cuando el vehículo se coloca simétricamente encima de éste. Este modelo es similar al de un transformador de núcleo de aire y como nos demuestra Klein (2006) es posible determinar con facilidad en que situaciones el lazo inductivo será más “sensible” al vehículo, es decir, cuando se producirá un mayor cambio en su inductancia.



1.16 Modelo de detección vehicular para una bicicleta. Tomado de Klein (2006)



1.17 Modelo de detección vehicular para un automóvil. Tomado de Klein (2006)

La sensibilidad de un detector de lazo inductivo es un concepto que nació a partir de esta necesidad de determinar en qué momento un cambio de inductancia podría ser considerado una detección vehicular. La fórmula 1.8 define la sensibilidad como un cambio en la inductancia con respecto a la inductancia.

$$S_L = 100 * \frac{L_{NV} - L_V}{L_{NV}} = 100 * \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Fórmula 1.8}$$

Dónde:

S_L = Sensibilidad del lazo inductivo.

L_{NV} = Inductancia sin vehículo presente.

L_V = Inductancia con vehículo presente.

A partir del modelo de la figura 1.17 y las relaciones matemáticas de la inductancia en un transformador de núcleo de aire, Klein (2006) llegó a la conclusión de que la sensibilidad de un lazo inductivo dependería de la relación entre el área del vehículo y el área del lazo inductivo, así como la distancia entre ambos, como se muestra en la fórmula 1.9.

$$S_L = \frac{A_v l_1 l_2 F_1}{A (d_{21})^2 F_2} \quad \text{Fórmula 1.9}$$

Dónde:

A_v = Área del vehículo.

l_1 = Longitud del lazo inductivo.

l_2 = Longitud de la espira sencilla.

F_1 = Factor de compensación del flujo magnético no uniforme del lazo.

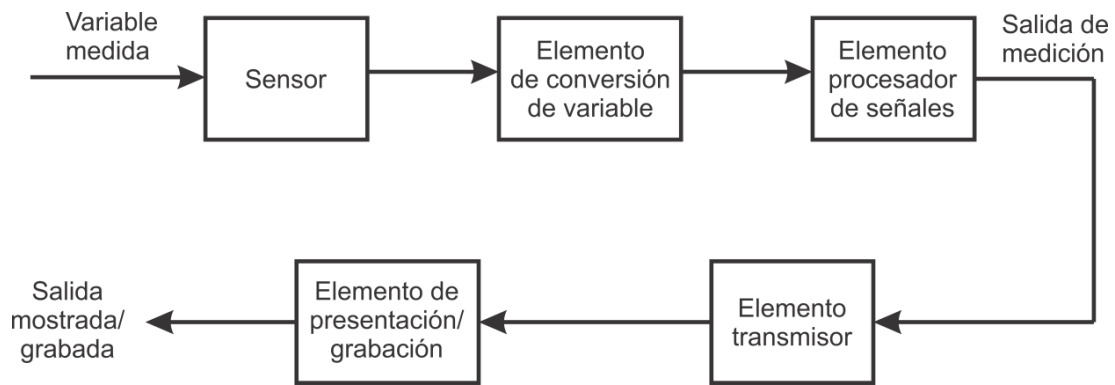
A = Área del lazo inductivo.

d_{21} = Distancia entre el lazo inductivo y el vehículo.

F_2 = Factor de compensación del flujo magnético no uniforme de la espira sencilla.

1.11 Sistemas de medición

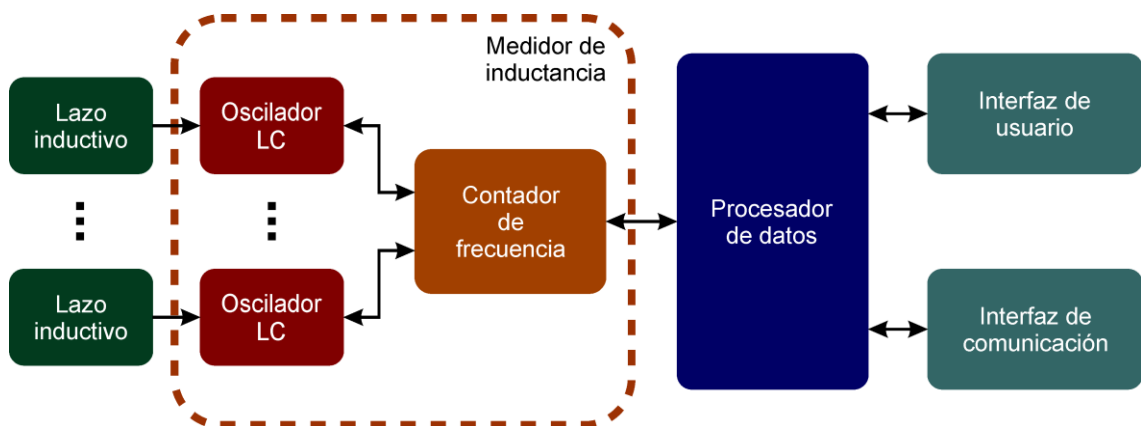
Según Morris (2001) un sistema de medición existe para proveer información acerca del valor físico de alguna variable siendo medida. Tales sistemas pueden consistir de un solo elemento que da directamente una salida correlacionada con la variable medida, o pueden ser más complejos consistiendo generalmente de diferentes elementos como los mostrados en la figura 1.18.



1.18 Elementos de un sistema de medición. Tomado de Morris (2001)

El primer elemento es el sensor, el cual se encarga de interactuar con el proceso a medir y dar como resultado una señal que sea función de la variable de interés. Luego esta señal pasa a través de un elemento de conversión de variable, que la convierte a una forma más conveniente. Entonces, un elemento de procesamiento de señales se encarga de mejorar la calidad de esta señal. Generalmente en esta etapa el sistema de medición ya tiene garantizado el objetivo de proveer una señal adecuada en función de la variable de interés; no obstante, algunos de estos sistemas añaden un elemento de transmisión y/o un elemento de presentación/grabación de datos siempre que esto forme parte de los requerimientos del sistema.

La estructura de un detector de lazo inductivo puede reorganizarse para asemejarse a la de un sistema de medición, como se muestra en la figura 1.19.



1.19 Detector de lazo inductivo como sistema de medición.

En este esquema el elemento sensor queda integrado por el lazo inductivo junto al alambre y el cable de alimentación; además el oscilador LC puede ser tomado como parte del sensor ya que asegura la alimentación del lazo con corrientes oscilantes que permiten su interacción con los vehículos. La frecuencia de estas corrientes es transformada en un formato más adecuado por medio del contador de frecuencia. En conjunto con el oscilador LC, la frecuencia medida puede ser a la vez transformada en la inductancia del lazo; por tanto, el medidor de inductancia formado por el oscilador y el contador funcionan tanto como un elemento de conversión de variable, así como un elemento de procesamiento de señales. No obstante, la inductancia debe ser interpretada a la vez como una detección vehicular (la verdadera variable de interés), por medio de otro procesador. Los elementos de transmisión y de presentación de datos son incluidos en el sistema; la transmisión se usa para proveer la información de manera remota a los sistemas de control y monitoreo de tráfico vehicular, y la presentación sirve en el proceso de calibración del detector. En el detector de lazo inductivo, un solo procesador puede formar parte de los elementos de procesamiento de señales, de transmisión y de presentación de datos, como se explicará en la sección 1.11.3.

1.11.1 Lazo inductivo

El lazo inductivo es una bobina corta instalada en las vías de tránsito de manera que interactúe con la carrocería de los vehículos circulando en sus cercanías. Una unidad de detección electrónica se encarga de excitar el lazo e interpretar el comportamiento de su inductancia como una detección vehicular. La forma, el tamaño y el tipo de instalación se eligen acorde a requerimientos específicos del esquema de gestión tráfico.

El lazo inductivo puede ser utilizado en detección de área pequeña, donde el objetivo primordial es detectar el paso de vehículos; al contrario, un lazo inductivo usado en detección de área grande debe detectar tanto la presencia como paso de vehículos. Los primeros pueden construirse de diferentes formas (cuadrada, rectangular, circular, etc.) y su tamaño no excede los 6 metros. Los últimos se

construyen generalmente de forma rectangular o utilizando lazos de área pequeña conectados en serie *emulando* un lazo grande.

Los lazos inductivos se instalan en el centro del carril y con un área cercana al área de un vehículo promedio con el fin de maximizar su sensibilidad y favorecer el proceso de detección. Así mismo la sensibilidad de la unidad de detección, esto es, el valor al cual ésta interpreta los cambios de inductancia como el paso de un vehículo, se configura para favorecer la detección de los vehículos que pasan por determinado carril y evitar detectar aquellos que pasan por otros carriles (esto es, *splashover*). Si el lazo inductivo se instala cerca de otro lazo o de una estructura metálica de considerable área, la magnitud de los campos magnéticos ajenos puede debilitar o anular la respuesta del lazo inductivo ante el paso de los vehículos. Cuando esta interferencia se produce entre lazos inductivos se denomina *crosstalk*, lo que era muy común en los primeros detectores. Como se puede ver el área de detección del lazo inductivo depende del sistema entero y de ciertos elementos externos.

Al estar el lazo inductivo colocado en serie tanto con el alambre como el cable de alimentación, se hace necesario mantener limitada la longitud de estos últimos debido no sólo a las pérdidas resistivas sino también a la inductancia que añaden estos elementos. Así pues, la inductancia añadida por estos conductores “engaña” a la unidad de detección, la cual mide en realidad la inductancia de todo el conjunto.

El proceso de instalación de un lazo inductivo es un elemento clave para optimizar la tarea de detección ya que una instalación adecuada evita que el lazo sea destruido o perturbado por las inclemencias de las vías de tránsito. El proceso de instalación de un lazo permanente se puede resumir en 7 pasos: cortar una ranura en el pavimento, lavar y secar la ranura, colocar el alambre del lazo dentro de la ranura, sellar la ranura, conectar el alambre al cable de alimentación, conectar este cable al controlador y asegurarse que el sistema funcione correctamente. Para la instalación de un lazo temporal, solamente es necesario dar forma al lazo,

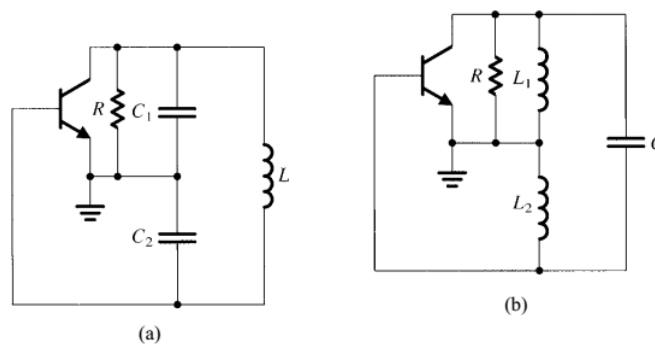
colocarlo en las vías de tránsito y sujetarlo ya sea por medio de clavos o alguna cinta especial. Para construir un lazo inductivo, el tipo más común de alambre utilizado es el multifilar, ya sea de calibre 12, 14 ó 16 AWG, y con recubrimiento de polietileno de enlace cruzado (XLPE, por sus siglas en inglés). La forma más común de lazo inductivo en los Estados Unidos es un cuadrado de 6 pies y tres vueltas de alambre.

1.11.2 Medidor de inductancia

El medidor de inductancia funciona a la vez como un elemento de conversión de variables, así como un elemento de procesamiento de señales, además de proveerle alimentación adecuada al sensor (lazo inductivo). Existen diversos tipos de medidores de inductancia, entre los cuales sólo son útiles aquellos que alimentan al lazo inductivo con corrientes oscilantes: una fuente sinusoidal alimentando el lazo y una resistencia variable o un oscilador LC con el lazo formando parte del circuito sintonizado. En ambos casos, un contador de frecuencia es necesario para obtener la frecuencia de la señal de salida y calcular la inductancia. El segundo método es utilizado como estándar en los detectores de lazo inductivo.

1.11.2.1 Oscilador LC

Es un oscilador que usa circuitos sintonizados LC como elementos de retroalimentación de un amplificador (generalmente un transistor). La figura 1.20 muestra dos osciladores LC comúnmente usados.



1.20 Modelo AC de dos osciladores LC comunes: (a) Colpitts y (b) Hartley

Ambos usan impedancias capacitivas e inductivas para retroalimentar los amplificadores, de manera que la razón entre las impedancias de entrada y de salida y la ganancia del amplificador determinan la condición de oscilación, como muestra la fórmula 1.10.

$$\frac{g_m r_o X_1}{X_2} > 1 \quad \text{Fórmula 1.10}$$

Dónde:

g_m = Transconductancia del amplificador.

r_o = Resistencia de salida del amplificador.

X_1, X_2 = Reactancia de los elementos de retroalimentación del oscilador.

La frecuencia de oscilación será igual a la del circuito sintonizado, dependiendo solamente de las impedancias capacitivas e inductivas (Fórmula 1.11).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{Fórmula 1.11}$$

Dónde:

f = Frecuencia de oscilación.

L = Inductancia equivalente del circuito de retroalimentación.

C = Capacitancia equivalente del circuito de retroalimentación.

El esquema de oscilador Colpitts es usado en detectores de lazo inductivo debido a que la inductancia del lazo no influye directamente en la condición de oscilación. Además, el oscilador Colpitts permite determinar los cambios de inductancia relativa haciendo uso solamente de la frecuencia de oscilación, siempre que estos cambios sean mucho menores que uno (Fórmula 1.12).

$$S_L = -2 * \frac{\Delta f}{f} = -2 * \frac{f_v - f_{nv}}{f_{nv}} \quad \text{Fórmula 1.12}$$

Dónde:

f_v = frecuencia en presencia de vehículo.

f_{nv} = frecuencia en ausencia de vehículo.

El rango de inductancia recomendado para que trabaje un detector de lazo inductivo es de 20 a 2000 microhenrios, y el rango de frecuencia es entre 10 y 200 kilohertzios.

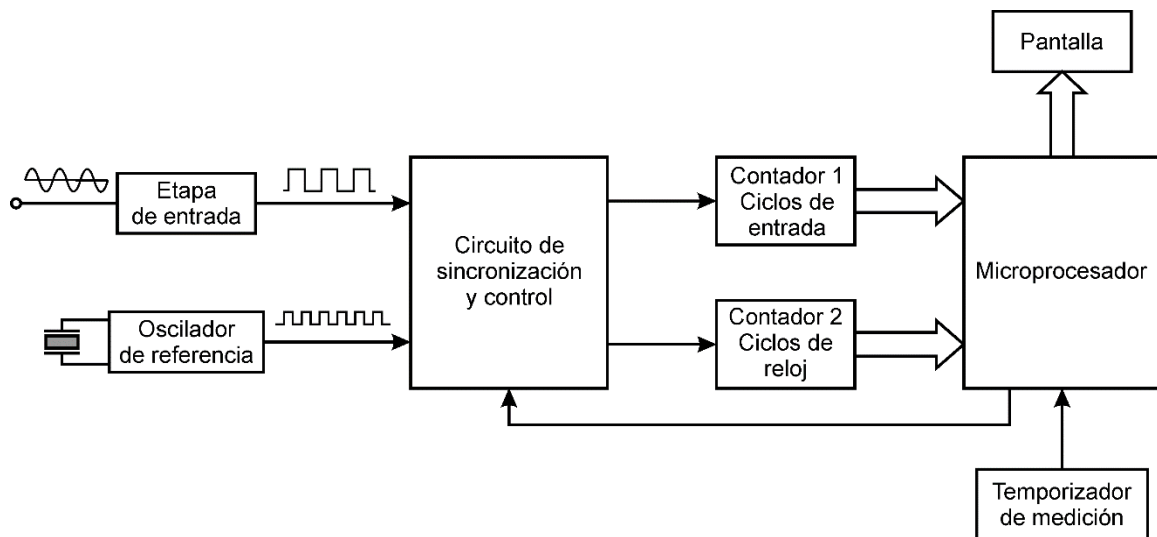
Los detectores de lazo inductivo utilizan osciladores con características adicionales para alcanzar objetivos fundamentales: la capacidad de encender y apagar el oscilador le permite a un detector operar varios lazos inductivos a la vez y evitar la interferencia entre estos; la capacidad de cambiar de frecuencia de oscilación también permite evitar la interferencia de crosstalk; el aislamiento entre el lazo inductivo y la unidad de detección es un mecanismo fundamental para garantizar la vida útil del sistema.

1.11.2.2 Contador de frecuencia

Un contador de frecuencia es un sistema de medición que sirve para representar adecuadamente la frecuencia de una señal oscilante. El contador de frecuencia más común es utilizado sólo en señales sinusoidales, y funciona calculando la frecuencia media de tales señales sobre un periodo de tiempo definido. Johansson (2005) clasifica los contadores de frecuencia sinusoidales en cuatro tipos: conteo convencional, conteo recíproco, conteo recíproco interpolado, y conteo por promedio continuo de múltiples estampas de tiempo.

En un contador de frecuencia la exactitud y la resolución son directamente proporcionales al tiempo de medición, pero también dependen del método utilizado. En un detector de lazo inductivo donde normalmente se requieren tiempos de respuesta máximos de unas décimas de segundo, es necesario elegir

un método de conteo de frecuencia que no sacrifique la exactitud y resolución para disminuir el tiempo de medición. Un contador de frecuencia recíproco es generalmente suficiente para cumplir este requerimiento y es utilizado en muchos detectores de lazo inductivo comerciales. La figura 1.21 muestra la estructura de un contador recíproco.



1.21 Estructura de un contador de frecuencia recíproco

El contador recíproco estima la frecuencia de la señal de entrada de la siguiente manera: un microprocesador utiliza un temporizador para controlar el tiempo en que se llevará a cabo la medición, este habilita un circuito de sincronización que se activa por medio de la señal de entrada y permite que tanto los ciclos de esta como los de un oscilador de referencia sean registrados en contadores digitales, una vez el temporizador del microcontrolador registra el tiempo solicitado, el microcontrolador deshabilita el circuito de sincronización y utiliza los registros de los contadores para estimar la frecuencia usando la fórmula 1.13.

$$f = \frac{N}{M * T_{ck}} = \frac{N * F_{ck}}{M} \quad \text{Fórmula 1.13}$$

Dónde:

N = número de ciclos de la señal de entrada.

M = número de ciclos del oscilador de referencia.

T_{ck} , F_{ck} = periodo y frecuencia del oscilador de referencia, respectivamente.

La resolución del contador recíproco está en función del número de pulsos contados del oscilador de referencia; de esta manera, la resolución puede ser aumentada ya sea aumentando el tiempo de medición o incrementando la frecuencia del oscilador de referencia. La precisión del contador recíproco es idealmente igual a ± 1 pulso del reloj de referencia. La resolución y la precisión del contador recíproco pueden ser mejorados a costa del incremento en la complejidad: un contador recíproco interpolado se construye añadiendo un medidor de intervalo de tiempo para determinar en qué fracción del pulso de reloj de referencia comienza y termina la medición. Este esquema podría utilizarse en lazos inductivos que requieran alta exactitud y bajos tiempos de respuesta, o para mejorar la resolución de la ocupación y otras variables temporales de tráfico vehicular.

1.11.3 Procesador de datos

El procesador de datos finaliza la etapa de procesamiento de señales al determinar la presencia de vehículos sobre el lazo inductivo. Para esto toma como referencia los cambios de inductancia con respecto al tiempo y la sensibilidad con que fue configurado, entre otros factores. El procesador de datos puede ser tanto analógico como digital, siendo este último la elección más común dado la necesidad de confiabilidad y flexibilidad en el proceso de detección. Potter y Reno A&E (2005) explican como la incorporación de la tecnología digital en los detectores de lazo inductivo mejoraron la confiabilidad de éstos y las características añadidas optimizaron el diagnóstico de la situación de tráfico vehicular y la detección y corrección de errores.

Un procesador digital puede ser construido en base a diferentes tecnologías: compuertas lógicas, microprocesadores, microcontroladores, arreglo de compuestas de campo programable (FPGA, por sus siglas en inglés), circuito integrado de aplicación específica (ASIC, por sus siglas en inglés), entre otros. En

los detectores de lazo inductivo, se usan exclusivamente microcontroladores dado su bajo costo, facilidad de uso, y la integración de diferentes elementos que reducen el tamaño total del sistema al realizar o complementar las funciones de las diferentes etapas del detector de lazo inductivo: conversión de variable, procesamiento de señales, transmisión y presentación/grabación de datos.

El procesador de datos de un lazo inductivo puede ser tan sencillo como un comparador que simplemente determina si el cambio de inductancia del lazo es mayor o no a cierto umbral. No obstante, debido a las variaciones en las condiciones medioambientales alrededor del lazo inductivo y el subsiguiente cambio en la inductancia de este en periodos largos de tiempo, se hace necesario compensar tales ocurrencias con el fin de que no se produzcan detecciones falsas de vehículos. Una solución a tal situación es la planteada por Masher (1975), donde la detección vehicular es determinada no solo por un umbral de frecuencia sino también por la dirección de ésta y un umbral de tiempo. Tres situaciones posibles emergen en este esquema: cambios de frecuencia producidos por condiciones ambientales, cambios de frecuencias producidos por vehículos circulando las vías, cambios de frecuencia producidos por un vehículo estacionado sobre las vías. En el primer y segundo caso, un temporizador adecuadamente calibrado permite al detector discriminar si los cambios de frecuencia son producidos por las condiciones ambientales o por los vehículos. En el segundo y tercer caso, un segundo temporizador determina si el vehículo se ha estacionado definitivamente sobre el lazo inductivo, y lo “olvida” para poder detectar futuros automóviles. Este esquema se usa solamente en detectores de lazo inductivo tipo presencia.

Otras funciones primordiales son realizadas por el procesador de datos: determinar si el lazo inductivo está en el rango apropiado de inductancia, determinar si los cambios de inductancia del lazo inductivo están dentro del rango permitido, usar los parámetros de detección configurados por el usuario, y brindar los parámetros adicionales a los elementos de transmisión y presentación/grabación de datos.

En detectores de lazo inductivo comerciales, los procesadores de datos se encargan de ofrecer las siguientes capacidades: indicar la detección vehicular como un pulso digital de duración constante (modo pulso, usado solo en detección de paso vehicular) o como un pulso correlacionado con el tiempo que el vehículo permanece encima del lazo (modo presencia); cambiar la frecuencia de operación del lazo; cambiar la sensibilidad de detección (siendo 0.02 % de cambio en la inductancia relativa el valor más común). Junto al cambio de sensibilidad, un detector puede mostrar el cambio de inductancia relativo al usuario con el fin de facilitar el proceso de calibración del detector: el procedimiento más común es establecer una sensibilidad donde un vehículo común produzca un cambio de inductancia relativo siete veces mayor a ésta con el fin de poder detectar confiablemente motocicletas y otros bicicletas.

1.11.4 Presentador de datos

El presentador de datos es un elemento integrado en el detector de lazo inductivo con el fin de permitir una adecuada calibración del sistema. Como ya se mencionó el sistema se calibra cambiando la sensibilidad para garantizar la detección de los vehículos de interés. En el caso que no se logre el objetivo cambiando la sensibilidad, se podría cambiar ya sea el diseño del elemento sensor o de los elementos de conversión de variables y procesamiento de señales. El presentador de datos también permite verificar si en el proceso de construcción o instalación del lazo no se lograron los objetivos deseados en sus características eléctricas (resistencia, inductancia) o si durante su funcionamiento se produce un daño al mismo. La interferencia de crosstalk puede ser detectada y solucionada por medio del presentador de datos al cambiar la frecuencia de operación del lazo. El elemento procesador de datos puede construirse de manera intuitiva y a un bajo costo como muestra Reno A&E en su modelo C-1000 (Figura 1.22).



1.22 Detector de lazo inductivo C-1000 de Reno A&E

1.11.5 Transmisor de datos

El transmisor de datos se comunica a distancia con los sistemas de monitoreo y control de tráfico vehicular. La presencia o no presencia de vehículos se puede transmitir en un solo bit con respecto al tiempo ya que solo toma dos valores. Los detectores de lazo inductivo comerciales utilizan relevadores o interruptores de estado sólido para comunicar esta información, ya que generalmente estos se instalan en el mismo lugar en que está ubicado el controlador de tráfico. Si la información debe transmitirse a mayor distancia, se utilizan transmisores externos al detector de lazo inductivo. Al colocar los detectores cerca del controlador, se requiere que los cables de alimentación del lazo inductivo sean extensos y probablemente desensibilicen el sistema; un detector que integre un transmisor podría solventar esta situación a costa de un ligero incremento en el costo y complejidad del sistema.

1.11.6 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación proporciona la energía (corriente y voltaje) al sistema entero, y además se encarga de protegerlo contra interferencias externas o

internas que amenacen la integridad de los circuitos electrónicos. Las fuentes de alimentación se diseñan para cumplir determinados objetivos, entre los cuales los más primordiales son: eficiencia o gasto energético, costo, niveles de voltaje y corrientes requeridas, protección de sobrecorriente, estabilidad. Los detectores de lazo inductivo comerciales priorizan el costo, la estabilidad, y la protección de sobrecorriente en sus diseños. Su elección más común son los reguladores lineales, los cuales, a pesar de su baja eficiencia y elevado peso y espacio, son adecuados en cuanto costo y estabilidad. Además, reducen las preocupaciones por ruido que las fuentes conmutadas son más susceptibles a provocar.

1.12 Subsistema de monitoreo de flujo vehicular

El subsistema de monitoreo está diseñado para observar y llevar control de los datos de las variables de tráfico proporcionados por el subsistema de detección y el subsistema de control vehicular.



1.23 Subsistema de monitoreo de flujo vehicular

1.13 Sistemas de comunicación inalámbrica

Según Ratana Bhalla & Vardhan Bhalla (2010), la tecnología servicio de radio de paquetes general (GPRS, por sus siglas en inglés) implementa el dominio de

conmutación de paquetes, además del dominio de conmutación de circuitos. GPRS puede proveer tasas de datos desde 56 kbit/s hasta 115 kbit/s. Éste puede ser usado para servicios como acceso para el protocolo de aplicación inalámbrica (WAP, por sus siglas en inglés), servicio de mensajería multimedia (MMS, por sus siglas en inglés), Servicio de mensajería cortos (SMS, por sus siglas en inglés), y servicios de comunicación de Internet como e-mail y acceso al World Wide Web.

La tecnología EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) trabaja en la red GSM, y es preferida a GSM debido a su flexibilidad para transportar datos de conmutación de paquetes y datos de conmutación de circuitos.

3G ofrece una gama más amplia de servicios avanzados, así como una mayor capacidad de red por medio de la mejora de la eficiencia espectral. Incluye una capacidad de transmisión de datos HSPA (High-Speed Packet Access) de hasta 14.4 Mbit/s en descarga y 5.8 Mbit/s en carga. Y es además compatible con la tecnología 2G; es decir, GSM, GPRS y EDGE.

1.13.1 Módulo módem GSM/GPRS

Es una clase de dispositivo módem inalámbrico que establece comunicación con la red GSM y GPRS. Este requiere una tarjeta SIM (Subscriber Identity Module) para activar la comunicación con la red. También tiene número IMEI (International Mobile Equipment Identity) para su identificación. Y se comunica por medio de comandos AT para conectarse a la red GSM.

El módulo módem SIM800L tiene un set de interface serial nivel TTL, una interface de alimentación, una interface de tarjeta sim, y una interface de antena.

El SIM800L es un módulo GSM/GPRS cuatro bandas (850/900/1800/1900 MHz).

Características generales:

- multi-slot clase 12/10
- Estación móvil GPRS clase B
- Clase 4

- Clase 1
- Control vía comandos AT (3GPP TS 27.007, 27.005, y comandos AT mejorado SIMCOM)

1.13.2 Comandos AT

Los comandos AT son usados para controlar los módems; AT es la abreviación de Attention, también conocidos como comandos de Hayes que fueron usados por los módems de Hayes. Estos comandos inician con “AT” para llamar la atención del módem.

Los comandos AT con un módem GSM/GPRS o teléfono móvil pueden ser usados para acceder a la siguiente información y servicios:

- 1- Información y configuración perteneciente al dispositivo módem y sim card.
- 2- Servicio de mensajes cortos (SMS).
- 3- Servicio de mensajería multimedia (MMS).
- 4- Servicios de fax.
- 5- Enlace de datos y voz sobre la red móvil.

Hay cuatro tipos de comandos AT: comandos de prueba, comandos de lectura, comandos de configuración y comandos de ejecución.

Comandos de prueba: Se usa para chequear cuando un comando es soportado por el módem o no.

Sintaxis: AT<nombre del comando>=?

Ejemplo: AT+CMGF=?

Comandos de lectura: Usados para obtener configuraciones del módem o teléfono móvil para una operación.

Sintaxis: AT<nombre del comando>?

Ejemplo: AT+CNMI?

Comandos de configuración: Se usan para cambiar la configuración del módem para una operación.

Sintaxis: AT<nombre del comando>=valor 1, valor 2,..., valor N

Ejemplo: AT+IPR=9600

Comandos de ejecución: Se usan para efectuar una operación.

Sintaxis: AT<nombre del comando>=parámetro 1, parámetro 2,..., parámetro N

Ejemplo: AT+CMGS="+50587350615"

>Prueba sms

<Ctrl+Z>

Los comandos de lectura no pueden conseguir el valor del último parámetro asignado en un comando de ejecución porque los parámetros de los comandos de ejecución no se almacenan.

1.14 Lenguajes de programación

Python es un lenguaje de programación que tiene una estructura de datos eficiente de alto nivel y una simple pero efectiva mejora en la programación orientada a objetos. El intérprete Python y la librería estándar están libremente disponibles en forma fuente o binaria, además de módulos, programas y herramientas en <https://www.python.org/> (The Python Software Foundation, 2017).

Visual C# es un lenguaje de programación orientado a objetos, diseñado para aplicaciones empresariales, se caracteriza por gran robustez gracias a la recolección de elementos no utilizados (liberación de memoria) y a la seguridad en el tratamiento de tipos, seguridad implementada por medio de mecanismos de confianza intrínsecos del código. También es posible interactuar con otros lenguajes, entre plataformas distintas y con datos heredados, siempre que se cumplan ciertas condiciones (interoperabilidad por medio de los servicios de COM+ 1.0 y .NET Framework, compatibilidad con XML, etc.) (Microsoft, 2017).

La tecnología Java es una plataforma y un lenguaje de programación de alto nivel, que se caracteriza por ser simple, orientado a objetos, distribuido, multihilo,

dinámico, portátil, de alto rendimiento, robusto y seguro. En el lenguaje de programación Java, todo el código fuente está escrito primero en archivos de texto plano que terminan con la extensión .java, éstos archivos fuente son compilados en archivos .class por el compilador javac, el archivo .class contiene códigos binarios (lenguaje máquina), luego la herramienta lanzador java ejecuta la aplicación con una instancia de la máquina virtual de Java. Debido a que la máquina virtual Java está disponible en muchos sistemas operativos diferentes, los mismos archivos .class son capaces de funcionar en cualquiera de ellos (Oracle Corporation, 2017).

1.15 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación es el dispositivo encargado de suministrar corriente y voltaje al módulo módem GSM/GPRS así como al microcontrolador encargado de comunicarse con el módem a través de los comandos de AT. Esta garantiza los requerimientos de consumo y potencia de cada componente electrónico en el sistema de monitoreo, garantizando así la durabilidad y el correcto funcionamiento del sistema. Las fuentes de alimentación lineales son más sencillas (transformador, rectificador, filtro y regulador de tensión), generan menos ruido electromagnético y son de bajo costo cuando la demanda de potencia es baja, por lo que fueron elegidas para alimentar al modem GSM a pesar de que ocupan más espacio y generan más calor.

CAPITULO II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE TRÁFICO

2 Diseño e implementación del sistema de monitoreo de flujo vehicular y control inteligente de semáforos

En este capítulo son presentados aquellos elementos relacionados con el diseño e implementación de los principales subsistemas que conforman el sistema de monitoreo de flujo vehicular y el control inteligente de semáforos. En la figura 2 podemos observar el diagrama de bloques que resulta de la integración de cada uno de los subsistemas desarrollados en este trabajo monográfico.

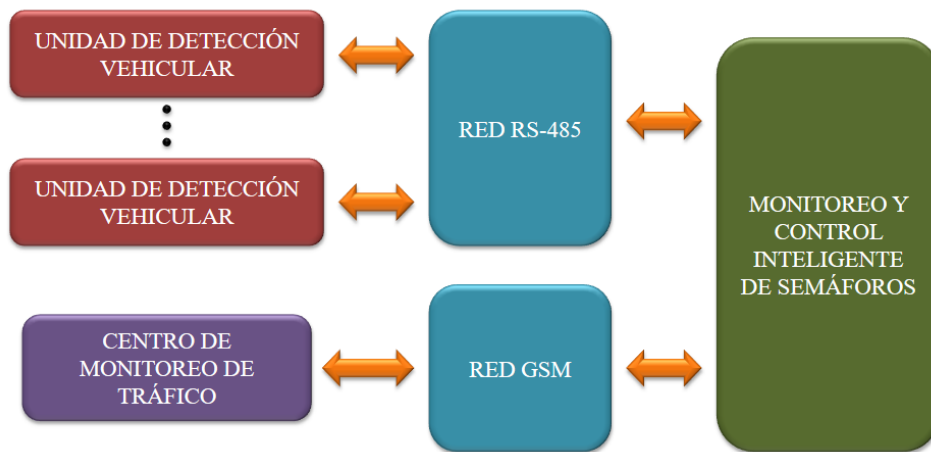


Figura 2. Diagrama de bloques general del sistema.

Como observamos en la figura 2 el trabajo monográfico se divide en tres grandes subsistemas:

- Subsistema de detección vehicular: En cargado de enviar información sobre el estado de cada uno de los sensores de lazo inductivo desplegados en la intersección al controlador de tráfico vehicular para que este pueda “conocer” el estado del tráfico en cada uno de los accesos y haciendo uso de esto se realice el proceso de toma de decisiones
- Subsistema de control de tráfico vehicular: encargado de procesar, interpretar y tomar decisiones sobre los parámetros de optimización en

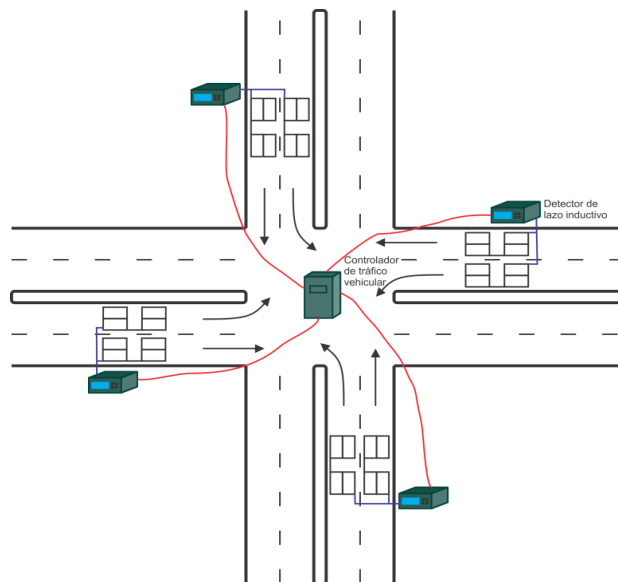
términos de la temporización de cada una de las señales luminosas de tráfico. El núcleo principal de este sistema es un sistema de inferencia difusa que interpreta de manera cualitativa los datos procesados provenientes de la unidad de detección vehicular.

- Subsistema de monitoreo de flujo vehicular: A través del uso de la red GSM se envía información del flujo vehicular, el estado de los semáforos y la temporización para cada una de las fases. Esto con el fin que las autoridades correspondientes tomen sus decisiones basados en datos actualizados.

2.1 Subsistema de detección vehicular

El subsistema de detección vehicular fue diseñado para cumplir primeramente con los requerimientos impuestos por los subsistemas de monitoreo y control inteligente de semáforos, esto es, suministrar los datos de tráfico vehicular que les permiten funcionar correctamente.

El sistema se desplegará como se muestra en la figura 2.1. Cada unidad de detección se coloca cerca de los lazos inductivos que maneja para maximizar la exactitud de detección. Una red RS-485 comunica todas estas unidades con el subsistema de control inteligente.



2.1 Subsistema de detección vehicular desplegado en una intersección semaforizada.

La implementación de una sola unidad de detección nos permitirá probar confiablemente la operación del sistema como si funcionara con todas las unidades requeridas. Además, el sistema no se implementará con un detector permanente, sino con uno temporal dado que se comportará de manera similar al anterior.

2.2 Determinación de los componentes del subsistema de detección

Como ya se mencionó, para probar el subsistema de detección sólo es necesario implementar una unidad de detección con su correspondiente lazo inductivo. A continuación, se listan los requerimientos específicos del sistema y la elección de los componentes que cumplirán tales objetivos.

2.2.1 Lazo inductivo

El lazo inductivo tiene como objetivo detectar confiablemente todo tipo de vehículos. Para lograrlo se ha decidido seguir el estándar estadounidense de un lazo con las siguientes características:

- Geometría cuadrada: un lazo cuadrado de tres vueltas con una longitud de 1.8 metros es adecuado dado que sus dimensiones se aproximan a la periferia del chasis de un vehículo promedio. Además, su baja complejidad reduce los costos de construcción e instalación.
- Materiales resistentes: se usa alambre multifilar dado que es más resistente a las tensiones presentes al momento de la instalación y puesta en funcionamiento del lazo. Se recomienda usar alambres con recubrimiento de polímeros como el polietileno de enlace cruzado (XLPE). El alambre tipo THHN también es recomendado y es el que utilizamos. El calibre recomendado gira en torno al AWG #14, el cual es el que elegimos.
- Instalación sencilla: se escogió implementar un lazo temporal dado los objetivos de solamente probar el prototipo. En la literatura aparecen diversas formas de implementar este esquema: se escogió un método sencillo donde se usaría solamente una cinta resistente (cinta para ductos) para fijar el lazo al suelo dándole la forma deseada (figura 2.2).



2.2 Detector de lazo inductivo temporal construido e instalado en base a cinta para ductos

La inductancia del lazo se calculó por medio de la fórmula 1.7 y se verificó que cada lazo construido estuviera dentro del rango de 50 y 700 microhenrios como recomienda Klein (2006).

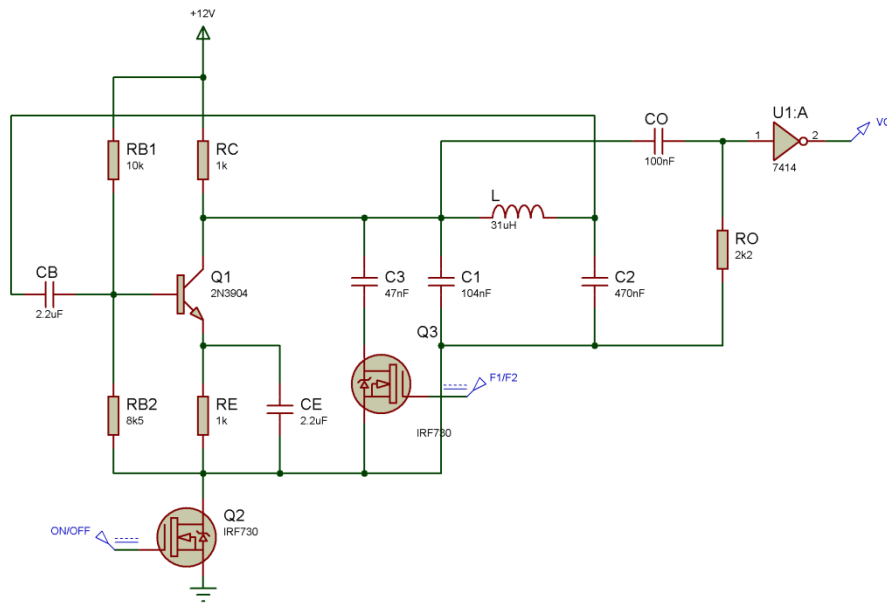
2.2.2 Oscilador LC

El oscilador LC le permite al lazo inductivo inducir las corrientes de Eddy y detectar los cambios de inductancia en función de cambios de frecuencia. Además, debe funcionar en determinadas situaciones:

- Rango de inductancia y rango de frecuencia: como ya se mencionó NEMA recomienda que la inductancia de los lazos ronde entre los 70 y 500 microhenrios. Ciertas unidades de detección comerciales extienden ese rango hasta 20 y 2000 microhenrios con el fin de poder trabajar con lazos inductivos muy pequeños (como los que necesitaremos utilizar en ciertas pruebas) y lazos inductivos muy grandes o conectados en serie (como los que se necesitarían en un escenario real con lazos inductivos permanentes). Para cumplir con este rango utilizamos las fórmulas 1.10 y 1.11 con el fin de obtener el valor de las impedancias necesarias para obtener un oscilador funcional.

- Capacidad de encender y apagar el oscilador y de cambiar de frecuencia: ambas funciones ayudan a minimizar la interferencia de crosstalk entre lazos inductivos cercanos. La primera además permite multiplexar las señales de los osciladores con el fin de usar un solo contador de frecuencia en el proceso de detección. En el primer caso, es necesario cambiar el estado de los osciladores en un tiempo mínimo de alrededor de 100 microsegundos o menos con el fin de esperar menos tiempo la estabilización de cada oscilador. También está implicado que cada conmutador trabajará incesantemente alrededor de 50 veces por segundo, lo que nos lleva a elegir sin duda transistores mosfet para la realización de estas tareas.
- Aislamiento entre el lazo y la unidad de detección: al proteger la unidad de detección de posibles anomalías en las corrientes del lazo inductivo, le podemos garantizar al usuario el continuo funcionamiento del sistema y en caso de fallas en el lazo mismo la detección temprana de estos sucesos. Un transformador con relación 1 a 1 nos permitirá operar el lazo confiablemente con el oscilador LC.
- Circuito de cuadrado: cada oscilador LC provee una salida senoidal que necesita ser multiplexada para poder operar con más de un lazo inductivo. Debido a la sencillez y confiabilidad de los circuitos digitales, se recomienda el cuadrado o conversión de esta señal analógica a una digital. Para esto se hace uso de compuertas lógicas NOR 7414 con salida Schmitt-Trigger, capaces de minimizar la influencia del ruido en su salida.

La figura 2.3 muestra un esquema inicial del oscilador LC del detector de lazo inductivo.



2.3 Primer oscilador LC del detector de lazo inductivo.

2.2.3 Contador de frecuencia

El contador de frecuencia permite interpretar cambios de frecuencia como cambios de inductancia en el lazo inductivo. En un detector de lazo inductivo multicanal como el propuesto, primero se energiza cada oscilador LC por separado, se espera a que se establezca su señal, se mide la frecuencia de tal señal en un determinado tiempo de medición y a una cierta resolución, las cuales influyen en la calidad del proceso de detección vehicular. El tiempo de medición porque generalmente es mucho mayor comparado con las otras etapas de la detección vehicular (encender y esperar el oscilador, interpretar la frecuencia como detección vehicular) y se trata sobre todo de minimizarlo, para que la frecuencia de oscilación de cada lazo inductivo se actualice de manera que en la gran mayoría de los casos ningún vehículo pase por desapercibido. Haciendo cálculos aproximados que dependen de la longitud del lazo inductivo (1.8 metros), la longitud mínima de los vehículos (1.2 metros) y la máxima velocidad esperada (60 km/h), se llegó a la conclusión de que el tiempo de respuesta del contador de frecuencia debería rondar los 0.18 segundos. Si hacemos referencia a las unidades de detección comerciales este tiempo rondaría los 0.2 segundos, lo cual

pusimos como techo. En cuanto a la resolución mínima del contador, esta se encuentra relacionada con la sensibilidad elegida para la detección como muestra la fórmula 2.1.

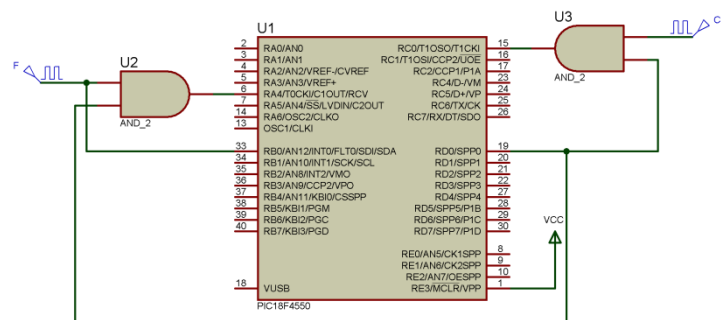
$$m = 1 - a \quad \text{Fórmula 2.1}$$

Dónde:

m = número de dígitos significativos de la frecuencia medida.

a = exponente de la sensibilidad expresada en notación científica.

Otra vez los detectores de lazo inductivo comerciales sirvieron como referencia para establecer sensibilidades objetivo: se escogió 0.02 % del cambio de inductancia relativa. Para tal sensibilidad se necesitan aproximadamente 5 dígitos de resolución relativa. El contador de frecuencia recíproco antes mencionado puede ser implementado para cumplir tales requerimientos haciendo uso de un oscilador de referencia de 8 MHz, compuertas lógicas (buffer triestado, compuertas NOT, compuertas AND, flip-flops), un microcontrolador con el firmware adecuado y una pantalla LCD. La figura 2.4 muestra un esquema inicial del contador de frecuencia.



2.4 Primer contador de frecuencia del lazo inductivo.

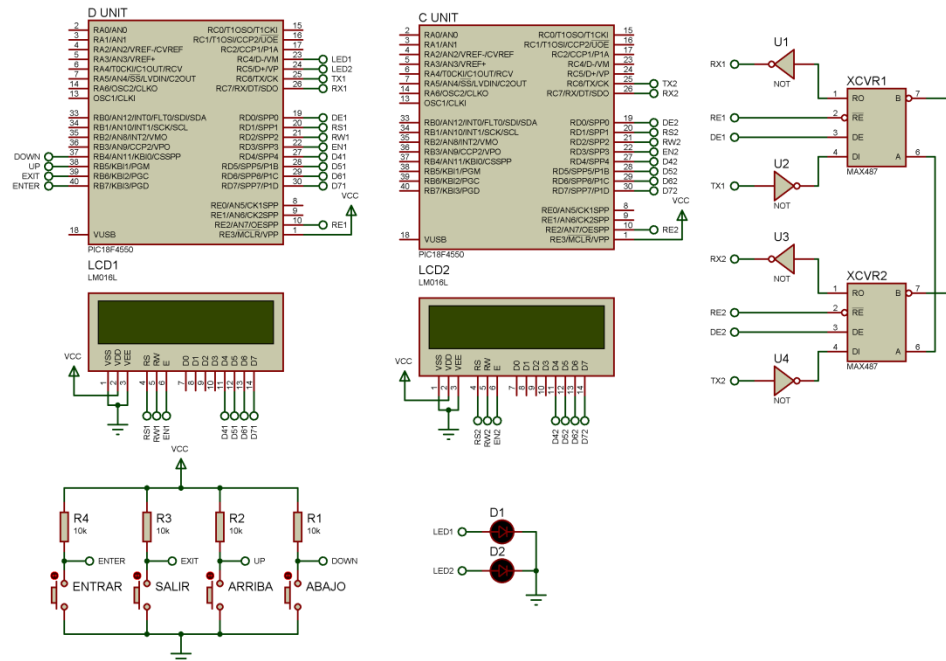
2.2.4 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario tiene como objetivo primordial garantizar el proceso de calibración del detector. Como ya fue mencionado es necesario que el usuario sepa si el lazo inductivo presenta las características adecuadas (inductancia,

resistencia) para hacer funcionar el oscilador LC. La frecuencia de operación del lazo es un parámetro que nos permite conocer si existe interferencia de crosstalk. El cambio de inductancia relativo y la visualización de la detección vehicular son fundamentales para el proceso de calibración. Por tanto, la interfaz de usuario como elemento presentador de datos fue construida a partir de una pantalla LCD y cuatro botones, además de unos diodos LEDs. La pantalla y los botones son la estructura principal ya que presentan un menú con las siguientes opciones:

- Una pantalla principal para cada canal o lazo inductivo (solo es visible y configurable un canal a la vez) donde se puede verificar el estado del lazo: apagado, con fallas (inductancia muy alta o muy baja), detectando o no detectando vehículos. Cuando se produce la detección, una serie de barras indican cuantos niveles de sensibilidad sobrepasó el vehículo en cuestión lo que facilita el proceso de calibración al decirle al usuario cuan sensible es el detector a cada tipo de vehículo.
- Un menú de configuración donde es posible cambiar la sensibilidad de cada canal y su frecuencia de operación. Para nuestro prototipo se eligieron seis niveles de sensibilidad y dos frecuencias diferentes.
- Un menú de datos que permite visualizar en la correspondiente pantalla principal ya sea inductancia, cambio de inductancia y frecuencia de operación del lazo.
- Una opción para resetear cada canal del detector.
- Una opción para guardar en memoria no volátil la configuración del usuario.

El uso de LEDs añade redundancia a la interfaz de usuario con el propósito llamar la atención al usuario cuando una posible anomalía ocurra en un canal no visible al usuario. Cada LED permite saber si existe detección o si la inductancia del lazo está fuera de límite. La figura 2.5 ilustra las características relevantes de la interfaz de usuario.



2.5 Interfaz de usuario y de comunicación del detector de lazo inductivo..

2.2.5 Interfaz de comunicación

La interfaz de comunicación o transmisor de datos debe permitirle a cada detector de lazo inductivo transmitir la información que posee sobre cada lazo inductivo. Los requerimientos primordiales son transmitir la información de manera confiable, en un tiempo adecuado y a un costo asequible. Dado que diferentes unidades de detección deben comunicar su información a un solo controlador de tráfico vehicular, un esquema maestro-esclavo es suficiente para la red de comunicación a implementar. Por sencillez y bajo costo se eligió la comunicación alambrada dadas las relativas cortas distancias entre los detectores y el controlador; una red basada en el estándar RS-485 es utilizada dado que permite implementar fácilmente el esquema maestro-esclavo, es robusta frente al ruido y la interferencia y adecuada a distancias considerables (hasta 1200 metros). Además, dada la naturaleza de los datos de los detectores no son necesarias altas tasas de transmisión (la tasa de transmisión mínima ronda los 50 bits por segundo).

Para implementar la red se usaron los transceptores MAX485 para la capa física, un módulo UART para la capa de enlace de datos, y un microcontrolador para la capa de red y superiores del modelo OSI. El microcontrolador como elemento central se encarga del manejo del transceptor y el módulo UART, además de manejar los algoritmos necesarios para implementar las capacidades de red y de procesamiento de la información entrante y saliente. Así cada detector de lazo inductivo es dotado con una dirección única a la que responder y un conjunto de códigos que envía al controlador de tráfico dependiendo del estado de cada uno de sus canales. La figura 2.5 ilustra la implementación de la red en el lado del detector de lazo inductivo y la figura 2.1 ilustra el posible despliegue de esta red.

2.2.6 Procesador de datos

El procesador de datos se debe encargar de interpretar los cambios de frecuencia del oscilador de lazo inductivo como detección vehicular. Para cumplir estas y otras funciones, se hace uso de un microcontrolador como ya fue explicado. El hardware y software del microcontrolador debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Funcionar como contador de frecuencia: para minimizar el costo del sistema el microcontrolador forma parte del contador de frecuencia y debe por tanto contener: dos contadores digitales de 16 y 24 bits de resolución, un temporizador con tiempos de espera de 500 μ s y 13 ms, una interrupción por cambio de estado lógico, capacidad de manejar compuertas lógicas y una pantalla LCD. En cuanto a software, debe poder realizar operaciones de punto flotante, convertir punto flotante a formato ASCII, manejar interrupciones en microsegundos.
- Funcionar como presentador de datos: el hardware del microcontrolador debe ser capaz de manejar una pantalla LCD, unos botones y unas luces LED. El software debe poder manejar las capacidades de la pantalla LCD, además de compartir información con las demás rutinas de software y manejar el algoritmo de la interfaz de usuario.

- Funcionar como transmisor de datos: el microcontrolador debe poseer además de puertos digitales, un módulo UART con capacidad de interrupción, y software capaz de interpretar direcciones y datos.
- Funcionar como procesador de datos: un temporizador dedicado para implementar un preciso reloj en tiempo real basado en software. En cuanto a software, capacidad de realizar cálculos de punto flotante.

Para el cumplimiento de los requerimientos de hardware se eligió el microcontrolador PIC18F4550 de Microchip. Para cumplir con el software, se utilizó el ensamblador y simulador MPLAB v8.56 también de Microchip, para implementar y corroborar los algoritmos del contador de frecuencia, presentador de datos, transmisor de datos y procesador de datos.

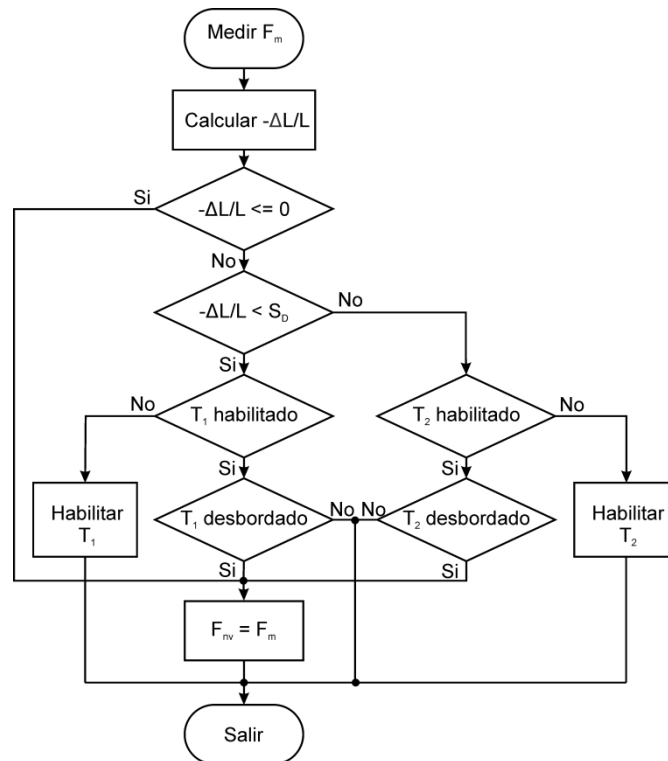
El algoritmo de procesador de datos como ya fue mencionado se basa en la patente de Masher (1975), y su pseudocódigo y diagrama de flujos se muestran en las figuras 2.6 y 2.7, respectivamente. Los valores para los temporizadores fueron elegidos basados en el primer caso para la velocidad mínima esperada por un vehículo (esto es 10 km/h) y en el segundo caso para el tiempo en que consideramos un vehículo se ha estacionado (5 minutos).

```

Si  $(-\Delta L/L \leq 0)$  entonces
     $F_{nv} = F_m$ 
De otra manera, si  $(-\Delta L/L < S_0)$  entonces
    Si (Temporizador 1 está habilitado) entonces
        Si (Temporizador 1 se ha desbordado) entonces
             $F_{nv} = F_m$ 
        De otra manera
            Habilitar temporizador 1
    De otra manera
        Si (Temporizador 2 está habilitado) entonces
            Si (Temporizador 2 se ha desbordado) entonces
                 $F_{nv} = F_m$ 
            De otra manera
                Habilitar temporizador 2

```

2.6 Pseudocódigo para el cálculo de la frecuencia de no vehículo. Adaptado de Masher (1975).



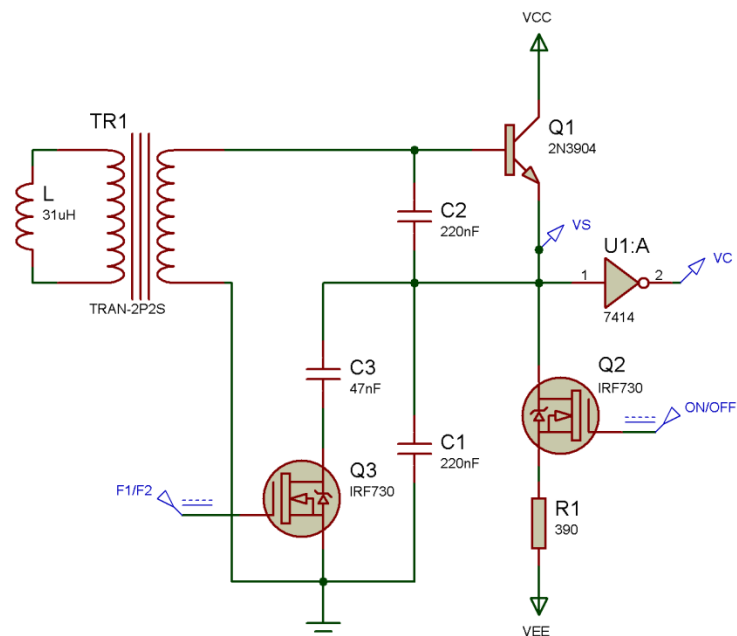
2.3 Simulación y rediseño del sistema

Una vez determinados los componentes de hardware y software, se procedió a la fase de simulación y rediseño: utilizando las herramientas de simulación Proteus y MPLAB se verificó el funcionamiento por separado de cada etapa del detector y se realizaron los cambios pertinentes. El lazo inductivo no se considera en esta etapa ya que su puesta a prueba es más adecuada en el proceso de emulación a escala. Por estar estrechamente relacionadas las etapas de presentación y transmisión de datos se evaluaron junto al diseño del procesador de datos.

2.3.1 Oscilador LC

El oscilador LC fue implementado en el software Proteus utilizándose su análisis basado en gráficas para corroborar las características de la señal de entrada: voltaje de salida, frecuencia, tiempo del transitorio. Se evaluaron tres tipos de osciladores todos basados en transistores BJT: emisor común, base común y colector común. En cuanto al voltaje de salida, solamente la configuración base común no cumplía con los requerimientos para poder accionar el circuito

cuadrador basado en la compuerta 7414, dado que sus voltajes no excedían los 2 voltios. En cuanto a la respuesta en frecuencia, la configuración de colector común era superior a las demás, dando como resultado una operación adecuada en el rango de 20 a 2000 micro-henrios, con una frecuencia de salida entre 8 y 110 kHz. Por último, el tiempo del transitorio era mínimo en la configuración de base común, y máximo en la configuración de emisor común. Por tanto, dado su simplicidad y óptimas características se eligieron la configuración de colector común para la posterior implementación en físico del oscilador LC. La figura 2.8 muestra los detalles del oscilador LC finalizado en el software Proteus.



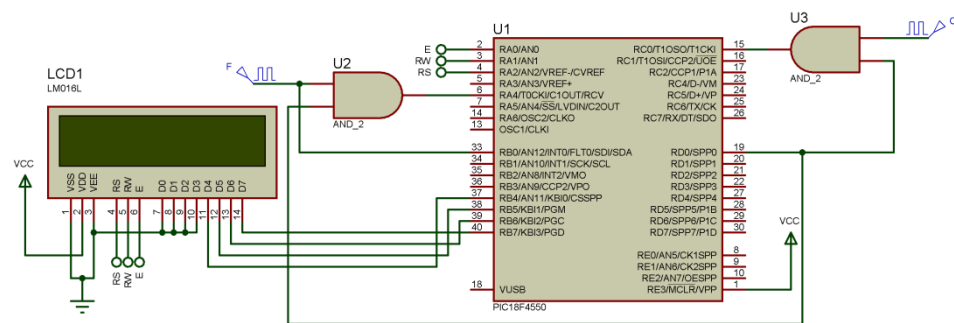
2.8 Oscilador LC del detector de lazo inductivo finalizado.

2.3.2 Contador de frecuencia

La simulación y rediseño del contador de frecuencia se realizó por medio del ambiente de desarrollo MPLAB v8.56 en conjunto con la suite de simulación Proteus. MPLAB se eligió por dos razones principales: utilizar el ensamblador MPASM, el cual nos permite desarrollar y ensamblar código ensamblador necesario para desarrollar software altamente eficiente en el manejo de los recursos del microcontrolador y sobre todo su pronta respuesta necesaria para mantener la exactitud y resolución del contador de frecuencia recíproco. La

segunda es el debugger MPLAB SIM, el cual es una herramienta intuitiva y útil en la depuración del código ensamblador permitiendo visualizar por completo el comportamiento del microcontrolador paso a paso, y sobre todo añadiendo la capacidad de modificar cualquier registro del microcontrolador simulando situaciones que permitan evaluar con rapidez y eficacia el software desarrollado. Luego por medio de la simulación interactiva de Proteus obtuvimos los resultados esperados.

En un primer intento por desarrollar el contador de frecuencia recíproco, se simuló el circuito mostrado en la figura 2.9.



2.9 Segundo contador de frecuencia del detector de lazo inductivo.

Para desarrollar el firmware del microcontrolador era necesario implementar en ensamblador el manejo de la pantalla LCD, el manejo de números de punto flotante (conversión, multiplicación y división), y la conversión del formato de punto flotante a formato ASCII a como lo reconoce la pantalla LCD. Todos estos requerimientos se cumplieron desarrollando bibliotecas basadas en las notas de aplicación (AP, por sus siglas en inglés) provistas por Microchip, entre ellas: AN575, AN587, AN617 y AN670. Luego el cálculo de frecuencia se realizó siguiendo la fórmula 1.13. En este ejemplo el microcontrolador hace uso de tres interrupciones: la interrupción del contador/temporizador 1 permite añadir un byte extra al conteo y conservar la resolución necesaria para el conteo; la interrupción del temporizador 3 permite establecer el tiempo requerido para la medición (aproximadamente 13 ms); por último, la interrupción externa le da la señal al

Este esquema es más realista porque ya contempla las tareas que tiene que realizar el microcontrolador para manejar los osciladores LC, además de la tarea que le asigna al flip-flop tipo JK. El software también se formaliza al implementarse la rutina del reloj en tiempo real que posteriormente será utilizado. El reloj en tiempo real funciona a partir de una interrupción de alta prioridad que garantiza que su funcionamiento sea tan preciso como lo es el oscilador con que trabaja el microcontrolador. Luego de corroborar su funcionamiento en MPLAB, se simuló en Proteus obteniéndose los resultados esperados.

2.3.3 Procesador de datos

El procesador de datos se verificó solamente en MPLAB, mientras que el presentador y transmisor de datos se verificaron primeramente en MPLAB y luego en Proteus.

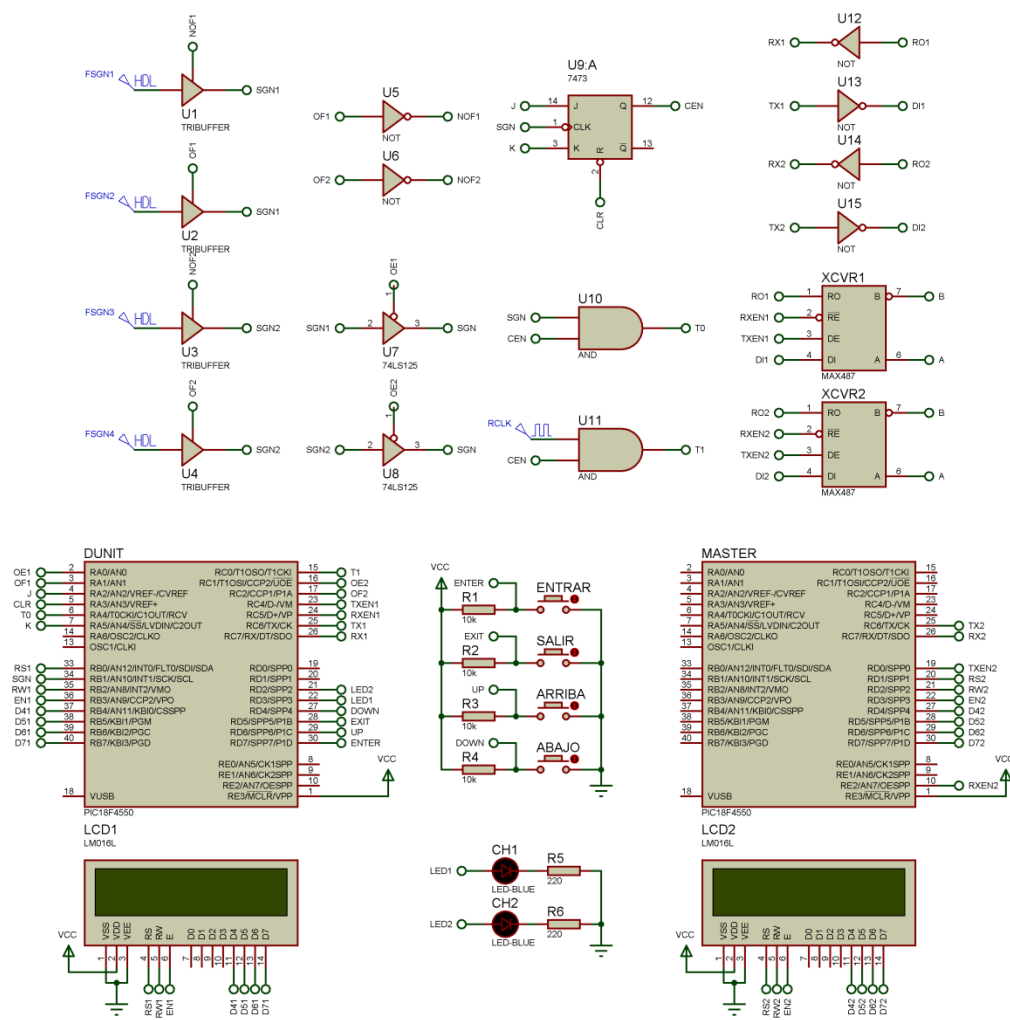
El procesador de datos trabaja de manera cíclica un canal a la vez: primero revisa que canal está disponible para trabajar, si hay alguno se bifurca al código correspondiente, en caso contrario va al final del ciclo donde se verifica el estado de los canales y se asigna el turno al siguiente canal. Cuando un canal toma su turno, primero se verifica que la frecuencia asignada (medida) a este esté dentro de los límites correspondientes, en caso contrario reinicia las variables asignadas al canal y almacena el tipo de error encontrado. Si la frecuencia se encuentra bien, se pasa al algoritmo de cálculo de la frecuencia de no vehículo. En un primer intento se planteó un algoritmo donde la frecuencia de vehículo fuera igual al promedio de frecuencias mínimas que se daban en intervalos de tiempo de 0.5 (8 intervalos en total). Luego que la frecuencia de no vehículo estuviera lista se calculaban parámetros como la inductancia y el cambio de inductancia relativo y se verificara que este último estuviera dentro de límite. Además, este prototipo incorporaba el cálculo de datos de tráfico como la ocupación, el espacio-tiempo y el número de espacio-tiempo.

La simulación del presentador y transmisor de datos se ilustra en la figura 2.5. Como puede verse un segundo microcontrolador hace de maestro en la red de comunicación maestro-esclavo. El software del presentador de datos se puede resumir de la siguiente manera: se revisa el estado de cada botón dándole prioridad a las funciones de entrar/aceptar y salir/rechazar; luego se verifica cual canal se debe mostrar en pantalla y que tipo de pantalla debe mostrarse, se mandan los datos a la pantalla LCD, y se verifica la activación de los botones, en caso positivo se procede a realizar la acción encomendada, ya sea cambiar de pantalla y/o modificar datos en el microcontrolador. En cuanto al transmisor de datos, el software se encuentra en espera de ser contactado por medio de la

interrupción de recepción, verifica si la dirección recibida coincide con la almacenada y verifica que tipo de acción debe realizar (calcular o enviar datos).

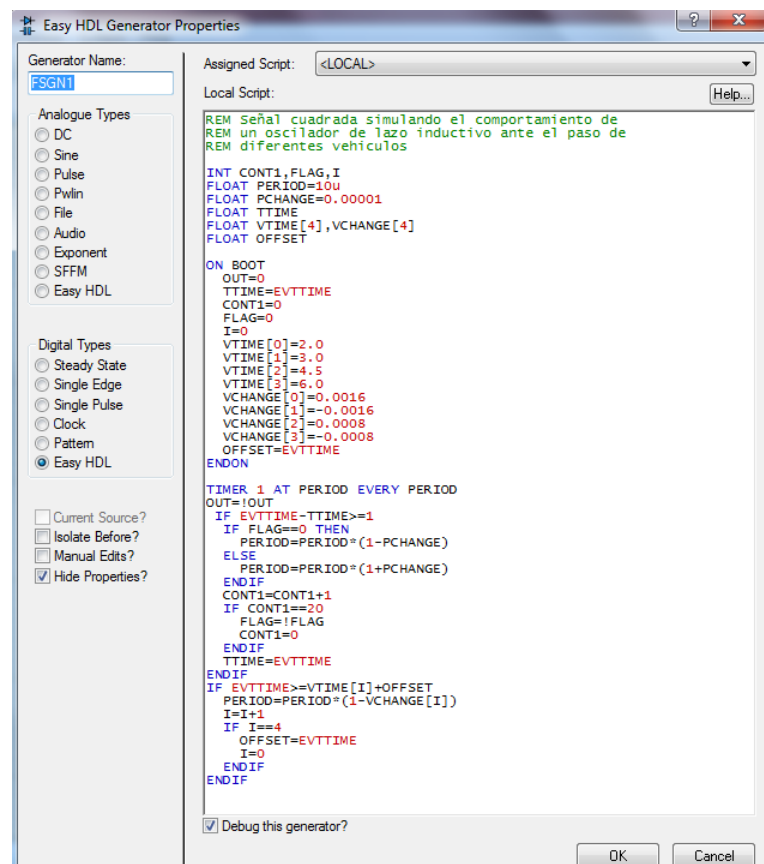
2.3.4 Detector de lazo inductivo

Luego de haber verificado por separado el detector de lazo inductivo, se procedió a simular el sistema entero. El objetivo primordial de esta prueba fue comprobar la capacidad de detección del sistema entre sus otras funcionalidades provistas en el presentador de datos, además de la capacidad de transmitir esos datos. La figura 2.11 muestra el sistema simulado en Proteus.



2.11 Detector de lazo inductivo simulado en Proteus. Se excluyen de la simulación el oscilador LC y el lazo inductivo debido a los altos requerimientos computacionales.

Se utilizaron las propiedades interactivas de Proteus para verificar en tiempo real su funcionamiento siguiendo los siguientes pasos: modelar el comportamiento de las señales que proveen los osciladores LC como si estuvieran circulando vehículos, verificar las detecciones en la interfaz de usuario y comprobar la recepción de datos por parte del controlador maestro. El primer paso fue el más esencial y se detalla a continuación: utilizando el modo generador de señales de Proteus con su lenguaje personalizado EasyHDL, se generó una señal que cambie su frecuencia con respecto al tiempo, esos cambios se hicieron coincidir con la sensibilidad del detector para emular el paso de los vehículos y se añadió un pequeño cambio continuo de frecuencia para verificar que el algoritmo de cálculo de la frecuencia de no vehículo no permitiera la aparición de detecciones falsas. El código implementado se puede observar en la figura 2.12.



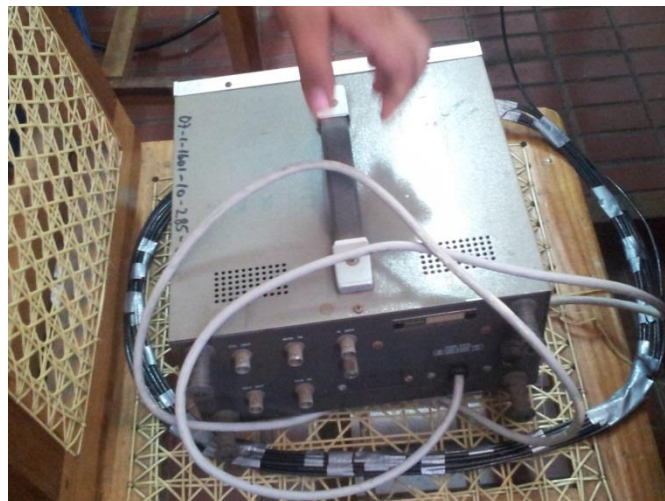
2.12 Cuadro de diálogo del generador de señales Easy HDL de Proteus utilizado para emular las señales proporcionados por un oscilador LC y lazo inductivo bajo flujo vehicular.

2.4 Emulación a escala

El detector de lazo inductivo fue implementado en tabla de nodos y probado con dos lazos inductivos a escala para verificar su funcionamiento. Tales pruebas se hicieron para corroborar la teoría del funcionamiento del lazo inductivo y realizar ciertas mejoras al detector, como se detallan a continuación.

2.4.1 Lazo de 30 cm

El detector de lazo inductivo se probó con un lazo cuadrado de 30 cm de lado y 6 vueltas, cuya inductancia fue corroborada por la fórmula 1.7. Se utilizó un aparato metálico (fuente de alimentación de laboratorio) para simular el vehículo en movimiento alrededor del lazo, como se muestra en la figura 2.13. Se utilizaron todas las sensibilidades programadas en el detector verificándose que reconociera el objeto metálico. Se notó un ligero retraso en el proceso de detección, y se sospechó que podría ser el tiempo que el contador de frecuencia se tardaba en responder. Se verificó poniendo el detector a trabajar tanto con uno como con dos canales activos a la vez, pero no se notó mejora. Se evidenció entonces que el algoritmo de cálculo de la frecuencia de no vehículo podría estar interfiriendo con el desempeño del detector, y se cambió por el propuesto por Masher (1975). Los resultados de una posterior prueba evidenciaron la eficacia del algoritmo de Masher. Se pasó por tanto a utilizar un lazo más adecuado a nuestros propósitos.



2.13 Lazo inductivo de 30 cm.

2.4.2 Lazo de 1 metro

La siguiente prueba se realizó con un lazo inductivo de 1 metro de lado y 4 vueltas en lugar del recomendado lazo de 1.8 metros y 3 vueltas. El objetivo fue comprobar los resultados de Blaiklock (2010) que estiman una exactitud de detección de hasta 97% con lazos inductivos de sólo 10 pulgadas de ancho, con el objetivo de usar lazos más pequeños y más fáciles de “rozar” por los vehículos conservándolos por más tiempo en las posteriores pruebas de campo. Este experimento se realizó en un espacio cerrado como se muestra en la figura 2.14 y dio como resultado una respuesta errática en el detector: se activaba la señal de detección de forma intermitente. Se verificó por medio de la interfaz del detector que la frecuencia oscilaba ligeramente más allá de la sensibilidad configurada, y por tanto solamente con el uso de sensibilidades menores se podía realizar la prueba. Debido a que nuestro objetivo era probar el detector a sensibilidad de por lo menos 0.02%, decidimos indagar sobre como suavizar el comportamiento de la frecuencia leída por el detector, y como resultado decidimos incorporar un promediador de frecuencia en el software de éste. De esa forma logramos desaparecer el comportamiento errático del detector a altas sensibilidades a costa de un ligero incremento en el tiempo de respuesta del detector.



2.14 Lazo inductivo de 1 metro.

2.5 Prueba de campo

El objetivo primordial de verificar la exactitud de la detección vehicular fue realizado en dos pruebas de campo, donde se utilizan tanto un sistema en tabla de nodos como uno en tarjeta impresa.

2.5.1 Tabla de nodos

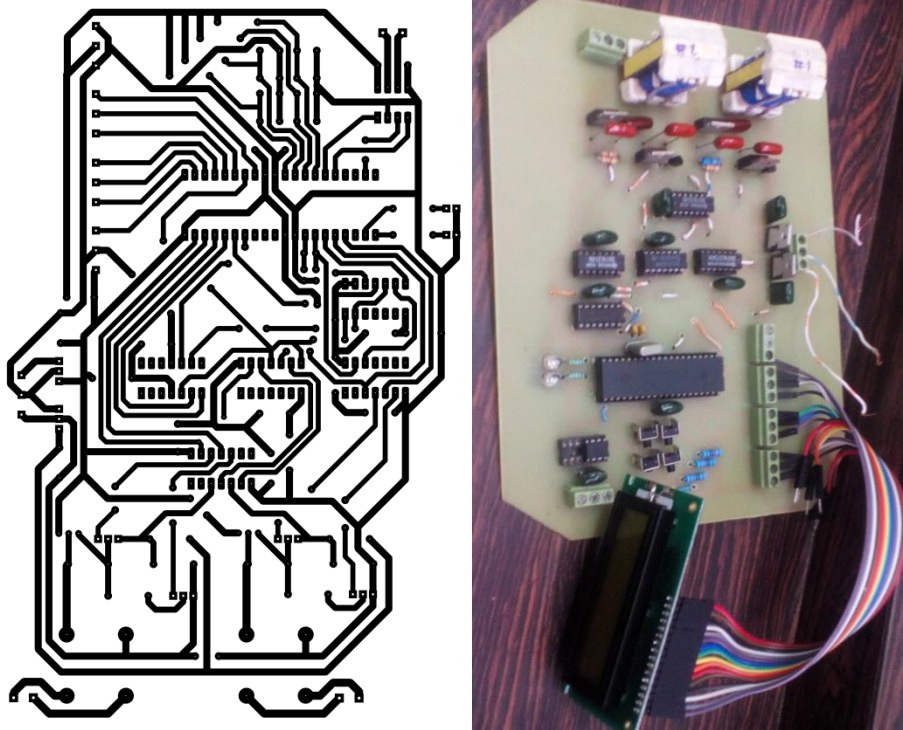
La prueba en tabla de nodos se realizó en una parte del parqueo de la universidad. Se instaló el lazo de 1 metro de ancho tal como se muestra en la figura 2.15. Una camioneta fue utilizada para simular flujo de tráfico alrededor del lazo verificando que detectara tal vehículo en las condiciones previstas. Se probó el sistema en la sensibilidad de 0.02% y se obtuvieron resultados entremezclados: por un lado, durante un tiempo el detector permanecía mostrando detecciones falsas, luego se estabilizó y detectó confiablemente la camioneta por unos minutos. Luego volvió a presentar inestabilidad en la salida. Después de posterior examinación se verificó que las conexiones no aseguradas en la tabla de nodos interferían con el desempeño del sistema por lo que se procedió a verificar el sistema por completo en tarjeta impresa.



2.15 Lazo inductivo de 1 metro en el parqueo de la Universidad Nacional de Ingeniería.

2.5.2 Tarjeta impresa

Se diseñó e implementó el sistema en tarjeta impresa haciendo uso del software Proteus y su módulo Ares. Las pistas resultantes y la tarjeta acabada se muestran en la figura 2.16.



2.16 Pistas y tarjeta PCB del detector de lazo inductivo

Después de corroborar su funcionamiento con el lazo de 30 cm se procedió a verificar su exactitud en una zona transitada. Se eligió una carretera rural al norte de Nindirí donde la instalación del lazo inductivo no perturbara mucho el flujo de tráfico. Se instaló el lazo de 1 metro y se configuró el detector a la sensibilidad de 0.02%. Se registró en papel y en video el desempeño del sistema. Los resultados se resumen en la tabla 2.1. Se obtuvo una exactitud del 93 %, donde los vehículos no detectados pasaron desapercibidos probablemente por el tamaño del lazo.

Tabla 2.1 Resultados de la primera prueba de campo del detector de lazo inductivo.

Tipo de vehículo	Detectado	No detectado	Exactitud
Vehículo ligero	20	2	90.9 %
Mototaxi	7	0	100 %
Vehículo mediano	16	1	94.1 %
Vehículo pesado	1	0	100 %
Total	44	3	93.6 %

Debido a recomendaciones del jurado evaluador de esta tesis, se realizó nuevamente esta prueba de campo, esta vez en el parqueo sur del recinto RUSB de la UNI por un periodo de aproximadamente 3 horas debido al mal clima que se presentó. Se instaló el lazo con el tamaño recomendado de 1.8 metros obteniéndose una exactitud de 100% con 84 vehículos evaluados, como se detalla en la tabla 2.2.

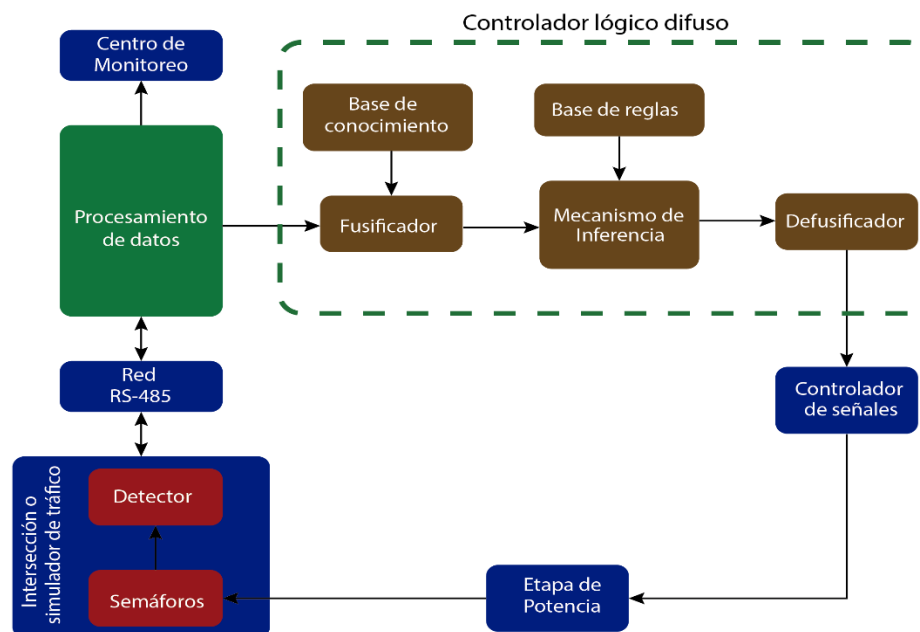
Tabla 2.2 Resultados de la segunda prueba de campo del detector de lazo inductivo

Tipo de vehículo	Detectado	No detectado	Exactitud
Motocicleta	2	0	100 %
Vehículo ligero	77	0	100 %
Vehículo mediano	3	0	100 %
Vehículo pesado	2	0	100 %
Total	84	0	100 %

Posteriormente, debido a las pruebas conjuntas con los demás subsistemas, el software del detector se modificó: se retiró el algoritmo de cálculo de datos para dar solamente datos de presencia de vehículos al controlador de tráfico vehicular; además, se verificó el algoritmo de transmisión de datos y se utilizaron interrupciones para garantizar la pronta respuesta del detector.

2.6 Modelo del subsistema de control de tráfico vehicular

El sistema de control de tráfico inteligente fue diseñado e implementado para reaccionar de forma dinámica a las variables presentadas en la sección 1.4, estas variables son descritas en términos lingüísticos y un algoritmo de toma de decisión difuso es aplicado para optimizar los parámetros de temporización descritos en 1.2 siguiendo una secuencia de fase fija. El esquema general del controlador de tráfico es presentado en la figura 2.17, así como los elementos con los que éste interactúa.



2.17 Esquema general del subsistema de control de tráfico vehicular.

Inicialmente el entorno de tráfico es simulado mediante una herramienta de modelación microscópica de movilidad, la cual se encarga de brindar al controlador información sobre el estado de los sensores. Con el fin de lograr una fuerte correlación entre la capacidad de la intersección y los datos recolectados por los sensores, estos se colocan cerca de la línea de parada, como lo sugiere Sim & Dobinson (1979). En la figura 2.18 podemos observar el layout de la intersección sobre la cual se diseñará el sistema de control, de igual manera se

Posteriormente al sistema de control de tráfico vehicular se le añade un prototipo de unidad de detección, logrando incorporar un elemento más de hardware, el lazo inductivo; esto con el fin de lograr un modelo realista del sistema propuesto. Los datos medidos por los sensores de lazo inductivos son procesados por el controlador de tráfico y estos son usados para la toma de decisiones, lo que garantizará una mejora a corto plazo en términos de la demora promedio, además parte de estos datos son enviados vía GSM a un centro de monitoreo para que las autoridades correspondientes tomen decisiones más fundamentadas en la situación de tráfico de la instalación particular, con esto pretendemos brindar un medio que garantice una mejora a largo plazo, ya que las autoridades

posteriormente pueden mejorar la infraestructura de transporte utilizando los datos obtenidos por el sistema.

2.7 Determinación del escenario de tráfico

El escenario de tráfico corresponde un conjunto de elementos que interactúan entre sí. Como en todo escenario de transporte tenemos elementos estáticos relacionados a las características geométricas de la instalación y elementos dinámicos correspondiente a los elementos que quieren hacer uso de la intersección. En primer lugar, decidimos limitar este estudio a las intersecciones de tráfico aisladas ya que proporcionan un punto de partida conveniente para realizar diferentes análisis sobre el impacto que una nueva política de gestión puede tener sobre un sistema más complejo, como es el caso de una red de intersecciones situación que comúnmente se presenta a lo interno de las ciudades.

La elección del escenario de tráfico es el punto de partida para establecer los requerimientos de diseño de los elementos del sistema de gestión de tráfico, y en esencia el algoritmo de control. Identificar el tipo de intersección, y sus consideraciones geométricas en términos del número de segmentos, ancho de carril, gradiente y los elementos que define el HCM (2000), afectan de manera considerablemente el alcance y la dirección de esta tesis.

La propuesta inicial de este proyecto fue diseñar el sistema de control y monitoreo de flujo vehicular para intersección tipo T (Roess et al., 2006, p. 550) ubicada en la entrada de la ciudad de Granada. Sin embargo, luego de hacer una revisión más profunda sobre la conveniencia que tiene este tipo de intersección para probar un nuevo sistema de control nos encontramos con los siguientes inconvenientes:



2.19 Propuesta inicial de la intersección a implementar el sistema de control de tráfico ubicada entre calle Inmaculada y avenida Arellano. (Captura de pantalla).

- Es un caso muy particular: Este tipo de intersección es un caso especial ya que el comportamiento flujo de tráfico no está completamente aislado, debido a que a escasos metros existe un acceso que forma una nueva intersección no señalizada cuyas políticas de control no están bien definidas (Gordon et al., 2005, p. 3-74).
- Información no disponible: No se tienen estudios precisos sobre las características de la demanda vehicular. Tampoco se disponen de datos como el volumen vehicular, composición de tráfico y rutas.
- Restricciones políticas y económicas: En la práctica hay barreras económicas y políticas que hacen poco conveniente instalar un nuevo sistema de gestión de tráfico, esto debido a la importancia y el impacto que estos tienen en términos de la seguridad de los usuarios.
- Numero de fases: En esta intersección solo existen tres fases para asignar el derecho de paso a cada grupo de señales. Esto es una limitación ya que la mayoría de las intersecciones cuentan con un total de cuatro fases en su plan de asignación de fases.

Ya que el objetivo general de esta tesis es diseñar un sistema de monitoreo de flujo vehicular y control inteligente de semáforos, y además probar la efectividad del sistema de control en términos de una reducción en la demora promedio de vehículos como se señaló en 1.4.6, se decidió tomar una intersección de tráfico que por las características de diseño de las ciudades se da con mayor frecuencia, y esta es presentada en las secciones siguientes.

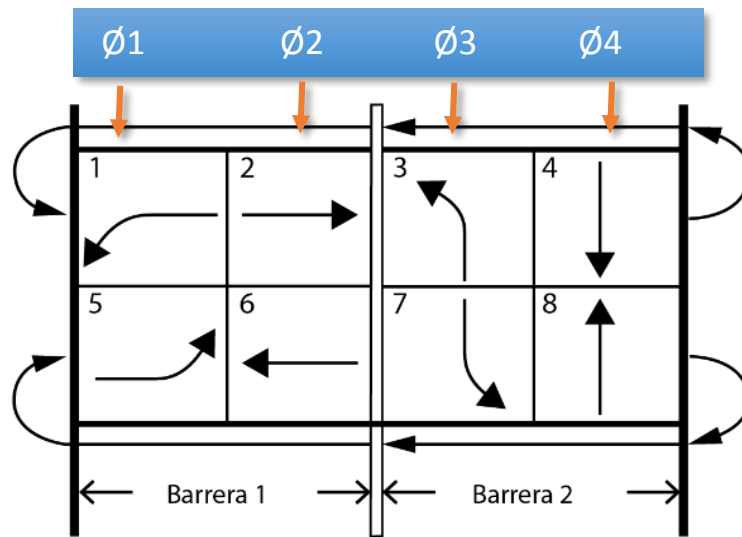
2.7.1 Consideraciones estáticas de la intersección seleccionada

En la figura 2.18 podemos observar una representación general de la intersección que se eligió para el estudio de esta tesis. Algunas de las características a tomar en cuenta al momento de elegir el escenario de transportes fueron las siguientes:

- Intersección de tráfico aislada: En la sección 1.4.1 se define lo que es una intersección de tráfico aislada. Generalmente, los estudios sobre el impacto que tiene una nueva política de control se realizan sobre este tipo de intersecciones ya que el comportamiento de tráfico vehicular no se ve influenciado por señales de tráfico vecinas, las características de demanda vehicular inciden de manera directa en el diseño de los controladores de tráfico en términos de sus parámetros de temporización y asignación de fases.
- Cuatro accesos dos líneas: la demanda vehicular puede provenir de 4 accesos, no existen canalizaciones ni bahías dedicadas a los giros a la izquierda. Cada segmento tiene una anchura de 3.6m y no se considera la influencia de la inclinación del terreno.
- No se consideran giros a la derecha. La política de gestión de los giros a la derecha implica la consideración de estudios sobre el flujo peatonal, en nuestro caso no consideramos la influencia del peatón en la corriente vehicular.
- Información disponible: Ya que la intersección de tráfico vehicular será modelada dentro de un escenario de simulación. Es posible comprobar la flexibilidad y la robustez del sistema de control bajo distintas demandas de

tráfico, mediante la obtención de datos por medio de distribuciones de probabilidad.

- Asignación de fases fija: El sistema de control de tráfico vehicular mantiene una secuencia de fase fija siguiendo un esquema “giros primero”. En la figura 2.20 podemos observar la secuencia de fase.



2.20 Diagrama anillo-barrera para asignación de secuencia de fases usualmente usada por controladores NEMA. En este caso se presenta un esquema “leading- left turn”. (elaboración propia).

2.7.2 Consideraciones de demanda vehicular

El intervalo de llegadas entre vehículos para cada acceso en la intersección se modeló siguiendo una función de densidad de probabilidad Pearson III. En general se tomaron en cuenta los escenarios que menciona May (1990), clasificando la corriente vehicular en como flujo de tráfico bajo, medio y denso, además subraya que la distribución de llegadas varía considerablemente conforme el flujo de tráfico incrementa (p.14). Como se menciona al inicio, para la prueba del algoritmo de control de tráfico se utiliza un simulador de tráfico microscopio el cual se abordará con más detalles en la sección 2.8. Para poder simular las rutas y las características físicas de los elementos dentro de la demanda, el simulador requiere el tiempo en el cual el vehículo es insertado dentro del escenario de

manera explícita, de forma que al final se requiere de un conjunto de metadatos definiendo cada uno de los vehículos que serán simulados. El tiempo en el que los vehículos son insertados está definido de manera individual y sigue una distribución que se ajusta de manera general a las condiciones de tráfico bajas, media y alta, que según May (1990) y Salter (1974) la distribución que más se ajusta a una aproximación general es la Pearson III.

Se prueba la flexibilidad del controlador de tráfico bajo tres tipos de escenarios de tráfico. Por motivos de comodidad al flujo de tráfico bajo del llamaremos CASO I, al flujo de tráfico medio CASO II y por último al flujo de tráfico alto CASO III:

- Flujo de tráfico bajo (8 -10 vehículos por minutos): Para esta condición de tráfico todos los vehículos parecen estar viajando independiente mente uno de otro, es decir la interacción entre vehículos es mínima y por lo general el conductor elige su velocidad de manera independiente al vehículo que lleva en frente. Akcelik (1994) utiliza una distribución exponencial mejorada para predecir intervalos de llegada menores de 12 segundos. Además, menciona que la distribución exponencial negativa no es conveniente para modelar intervalos de llegadas debido a su característica inherente de que valores más bajos de tiempo tiene una probabilidad mayor de ocurrencia. Es por ello que propone una versión mejora de esta distribución añadiendo un factor de desplazamiento (tiempo mínimo entre llegadas) y un factor de agrupamiento determinado por la cantidad de vehículos que esperan por la señal roja y los que llegan dispersos una vez la cola se ha disipado luego de una señal verde (intervalo verde no saturado).
- Flujo de tráfico alto (15 - 20 vehículos por minutos): Salter (1974) menciona que la distribución exponencial negativa modela de manera aceptable el flujo de tráfico cuando este es bajo, sin embargo cuando un vehículo no puede exceder la velocidad de su vehículo líder, este tiende a disminuir la velocidad de modo que, si esta situación se presenta de manera recurrente lo que se tendrá serán vehículos viajando a una velocidad casi constate e iguales cuya variación será solamente debido a la imperfección del

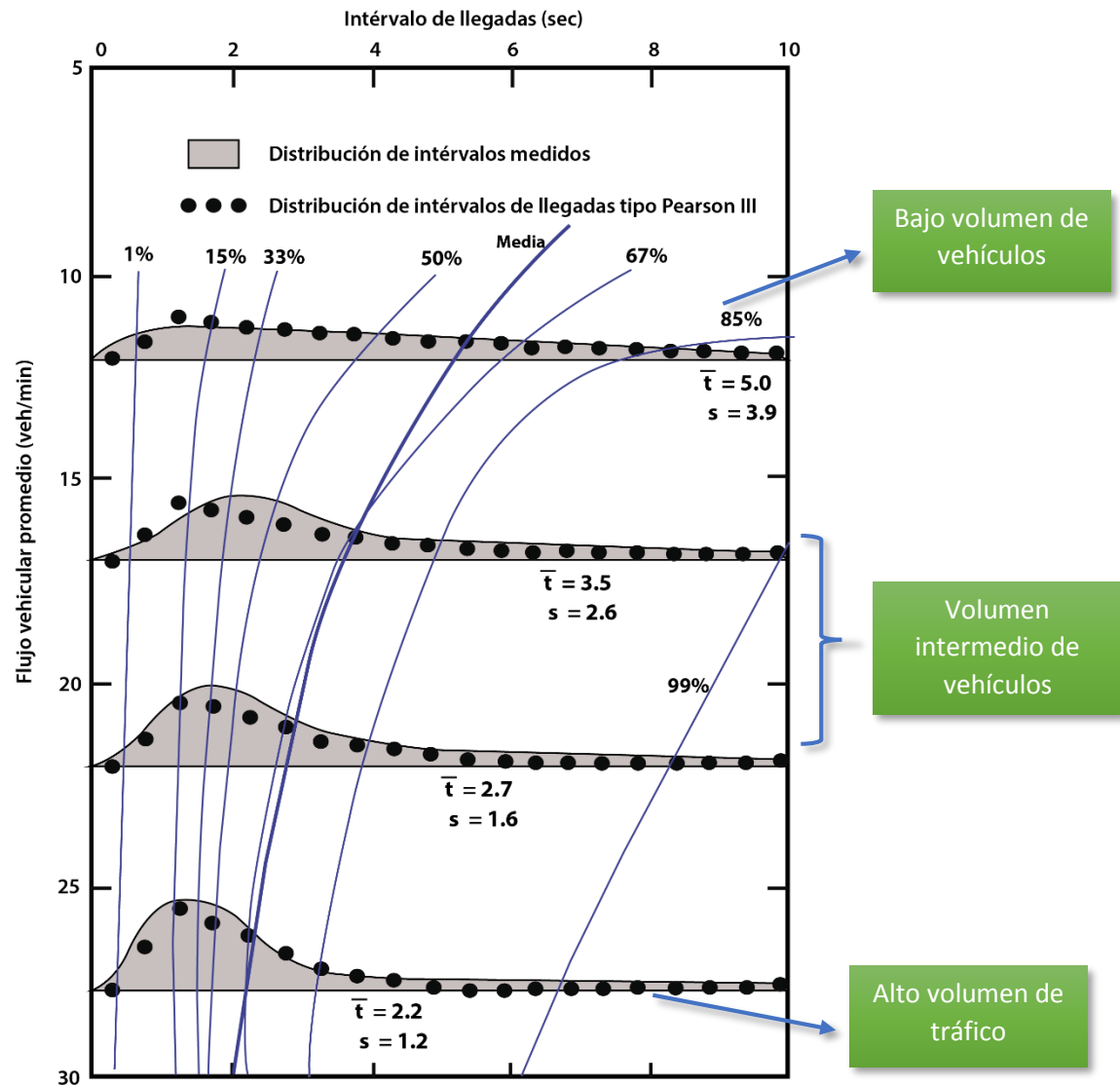
conductor al intentar mantener la velocidad y un intervalo mínimo de seguridad para que el vehículo que sigue al líder pueda frenar en caso de una aceleración negativa del vehículo líder. Bajo este escenario, el flujo de tráfico es muy denso y May (1990) menciona que la distribución normal se ajusta bastante bien a esta condición (p. 20).

- Flujo de tráfico intermedio (11 – 14 vehículos por minutos): Es considerada la situación más compleja de las anteriormente descritas y es la que usualmente se presenta en el mundo real. Bajo esta condición se tienen vehículos que parecen llegar en intervalos aleatorios (poca interacción) y en intervalos casi constantes (muchacha interacción entre vehículos). Su estudio involucra una modificación paramétrica de manera tal que la función de densidad de probabilidad se ajuste desde un espectro de distribuciones aleatorias a una distribución constante.

May (1990) realizó un estudio de los intervalos de llegadas bajo las tres condiciones mencionadas anteriormente. Éste agrupa los datos recolectados y los presenta en forma de distribución de frecuencia en intervalos de 0.5s, su objetivo es obtener una función de densidad de probabilidad que se ajuste de manera general a las tres condiciones de tráfico que se presentan en el mundo real. En la figura 2.21 observamos en gris la distribución de los datos agrupados medidos en una intersección real y superpuesto a esto observamos la distribución obtenida mediante la función de densidad de probabilidad tipo Pearson III, en esta grafica podemos observar que la distribución propuesta se ajusta a la distribución de datos recolectados mediante medidas de campo y Salter (1974) confirma esto (p. 113).

Por este motivo decidimos que la generación de intervalos de llegada seguirá una distribución de tipo Pearson III en lugar de la típica distribución exponencial que se usa para el análisis de llegadas de vehículos y se estudia de manera rigurosa al momento de configurar controladores de tipo actuado para ajustar parámetros de temporización en términos de la densidad de tráfico que se manejan a lo largo del día. Akcelik (1994) profundiza en este estudio proponiendo distribuciones de

llegadas más ajustadas al mundo real para que se usen los cálculos de temporización de controladores de tipo actuado y controladores de tiempo fijo.



2.21 Distribución de intervalo de llegadas que se usará para la generación de llegadas, según la distribución de Pearson III. Adaptado de May (1990).

Donde:

\bar{t} = Tiempo medio entre llegadas para distribución sombreada.

s = Desviación estándar.

2.7.3 Características físicas de los elementos de medición

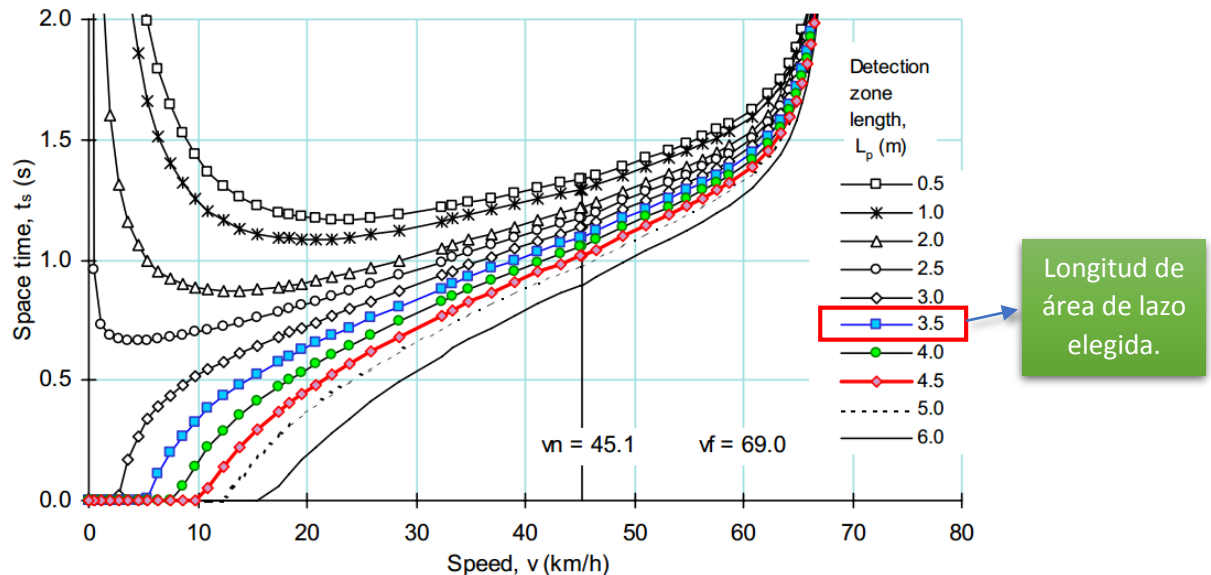
El último elemento estático dentro del escenario de simulación es el sensor de lazo inductivo responsable de informar al controlador cuando está sobre su área efectiva de detección un vehículo. Estos datos “crudos” (raw data) luego son procesados y de ellos son obtenidas variables como el conteo de vehículos (flujo vehicular), el intervalo de llegadas (headway), la ocupación y el tiempo que el lazo está libre durante el intervalo de tiempo verde (espacio-tiempo).

La dimensión física del elemento de medición y su ubicación es de gran importancia ya que una mala relación entre estas dos características dará como resultado una pobre descripción del escenario de tráfico o lugar a mala interpretación. Como requerimiento inicial se pensó en un sistema de control que trabaje únicamente con un lazo por cada carril de llegada, esto dará como resultado un sistema de detección vehicular mucho más barato y se reducirá la complejidad del sistema haciéndolo más robusto y mucho más factible en términos técnico y económico, teniendo siempre presente que la limitación de ubicar solo un lazo por carril de llegada no afecte su confiabilidad. Como idea principal se tiene que el elemento de medición sea capaz de obtener información sobre la capacidad de la intersección y de ahí, el controlador se encarga de determinar qué tan efectivas están siendo las decisiones tomadas por el algoritmo de control. Para lograr una fuerte correlación entre la capacidad de un acceso y el tiempo de verde que se es asignado Sim & Dobinson (1979) han recomendado colocar el sensor cerca de la línea de parada.

La longitud del área de detección se elige lo suficientemente corta, teniendo siempre presente que lazos muy cortos pueden dar como resultados valores de espacio-tiempo ambiguos con relación a la velocidad como lo indica la figura 2.22.

Un lazo con un área de detección de 1m es conveniente dado su fácil elaboración y su bajo costo de mantenimiento, sin embargo, en la figura 2.22 observamos que para valores de espacio tiempo cercano a 1.2s se tiene una relación con la velocidad ambigua. La solución a priori sería incrementar la longitud del lazo, pero

debemos tomar en cuenta que al hacer esto también se incrementará el costo de fabricación del lazo y su mantenimiento, por tal motivo se debe establecer una perfecta relación entre las variables que se desean medir, el costo, y el propósito para el cual se usaran los datos recolectados para el tráfico.



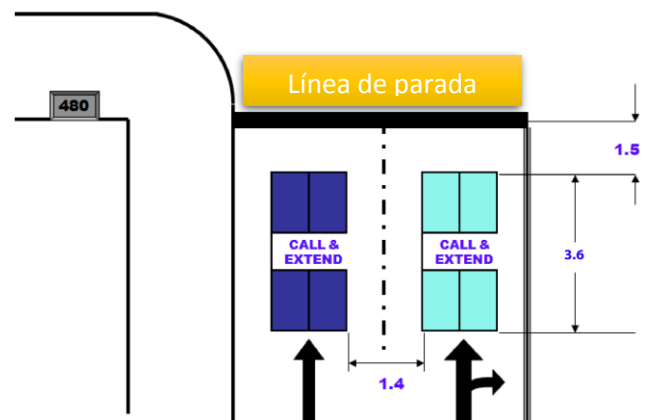
2.22 Relación espacio tiempo – velocidad como función de la longitud del área de detección para una intersección aislada y movimiento hacia el frente.
Tomado de Akcelik (1994).

Teniendo presente lo anteriormente dicho se eligió un detector de lazo inductivo cuya dimensión física es de 1.8m de ancho por 3.5m de largo ubicado a una distancia muy corta de la línea de parada. Con esto se garantiza:

- **Conteo de vehículos:** A medida que el área de detección incrementa, vehículos que viajan muy cerca entre sí (congestión), viajan a velocidades muy bajas, esto dará como resultado medidas de espacio tiempo de cero. Por ejemplo, para un lazo inductivo con un área de 4.5m vehículos viajando a velocidades menores a 10 Km/h serán ignorados del conteo, y su valor de espacio tiempo será cero, esto es útil ya que bajo estas condiciones es más fácil conocer si existen problemas de congestionamiento durante cierto periodo de tiempo y así tomar acciones, sin embargo, la posibilidad

de conteo se ve limitada. Con un área de detección de 3.5m se garantiza el conteo de vehículos que viajan a velocidades mayores a 5 Km/h.

- Valores de espacio tiempo sin ambigüedad: para un área de detección de 3.6m de largo, la relación entre los valores de espacio tiempo y velocidad son casi lineales. Dado un valor de espacio tiempo solo existe un único valor que lo relaciona con la velocidad, lo que garantiza en cierta medida la síntesis de la situación de tráfico en término del espacio tiempo
- Fácil de construir y bajo costo de mantenimiento: Dado que un solo lazo de 1.8m de ancho y 3.6m de largo puede ser un poco difícil de construir decidimos colocar en serie dos lazos de 1.8×1.8 m, con esto se facilita la construcción del lazo y además es además su mantenimiento es mucho más barato. Por tal motivo, el área de detección resultante es de 1.8m de ancho por 3.6m de largo. Y su configuración es mostrada en la figura 2.23.



2.23 Configuración del sistema del lazo inductivo y su ubicación sobre las líneas de acceso.

2.8 Diseño del controlador de tráfico vehicular

En esta sección se presentan los elementos tanto de software y hardware que conforman el sistema de control de tráfico vehicular, desde la etapa de diseño hasta su implementación.

El componente principal del sistema de control de tráfico en términos de hardware lo conforma un microcontrolador de gama alta de 8 bits PIC18F4550, sobre este componente se implementa un algoritmo de toma de decisiones difusa que se encarga de decidir cuando el ciclo debe incrementar o disminuir y además como este debe estar repartido entre las fases basándose en el criterio de elección de grado de saturación iguales para cada acceso, como lo recomienda el HCM (2000)

y como lo hacen sistemas de control comerciales tal como SCATS y el software de optimización y modelación de tráfico microscópico SYNCHRO. La secuencia de fase es como se muestra en la figura 2.20 y esta se mantiene fija durante todo el periodo de operación. El microcontrolador también se encarga de seguir un protocolo de comunicación implementado sobre el módulo USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) del PIC que se detallará más adelante, este protocolo permite el intercambio de información entre la unidad de detección vehicular y el simulador de tráfico. La información sobre el estado de cada uno de los sensores (8 lazos inductivos) se transmite a través de una red RS-485 y el microcontrolador se encarga de procesar los datos de presencia o no presencia de cada uno de los lazos para convertir estas medidas en las variables descritas en la sección 1.4.

La toma de decisiones difiere un poco con la usada en la mayoría de literatura revisada, trabajos como el de Trabia et al. (1999) y Shiri & Maleki (2016) basan la toma de decisiones en el principio de extensión cuyo objetivo es la búsqueda de un “gap” que permita interrumpir el flujo de tráfico que tiene luz verde, este esquema de control es usado en controladores de tráfico actuado comerciales. Mediante adición de lógica difusa se puede obtener un “gap variable” en base a la información del flujo vehicular medido en la línea que tiene derecho de paso y la cola de vehículos que están esperando en la próxima fase.

El esquema de control usado en esta tesis se basa en la toma de decisiones ciclo a ciclo como lo hace Chiu & Chang (1993), esto quiere decir que el sistema procesará la información recolectada durante todo un ciclo y en el próximo ciclo implementará las acciones basadas en las medidas del ciclo anterior. La razón por la cual elegir este esquema y no el de principio de extensión es por la sencilla razón que deseamos diseñar un sistema altamente flexible y además escalable, es decir que sea fácilmente extendido a una red de intersecciones para trabajos futuros, y esto solo se logra con una toma de decisiones ciclo a ciclo ya que sobre esta filosofía se puede calcular el ciclo y la repartición de fase de forma anticipada y con ello se puede lograr una perfecta coordinación entre controladores de tráfico

vecinos, de manera que el tráfico progrese de forma casi interrumpida sobre las vías con mayor demanda. Para lograr la coordinación los controladores de tráfico adyacentes deben manejar volúmenes de tráfico similares y además tener ciclos de tiempo muy similares. Haciendo uso del principio de extensión basado en la búsqueda de “gap” no se tiene absoluto control sobre el ciclo y la repartición de fases, por lo que alcanzar la coordinación bajo estas circunstancias es una labor realmente compleja.

La última tarea asignada al microcontrolador es enviar los datos obtenidos de la simulación o la unidad de detección haciendo uso del módulo MSSP (Master Serial Synchronous Serial Port) del PIC18F4550 configurándolo como un transmisor-receptor serial síncrono mediante el estándar de comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit). El controlador implementado sobre el PIC18F4550 hace la función de maestro, este se comunica con un único esclavo (PIC16F88) y le envía los datos para que este último controle a un modem GSM encargado de transmitir vía SMS la información recolectada.

2.8.1 Elección del microcontrolador

El microcontrolador se eligió siguiendo los siguientes criterios (Mazidi, Mckinlay, & Causey, 2008, pág. 26):

- Satisfacer las necesidades de cómputo para que estén sean manejadas de manera efectiva tanto operacionalmente como económicamente.
- Facilidad de soporte y disponibilidad de recursos para su uso. Esto incluye la disponibilidad de compiladores aceptablemente eficientes, simuladores, debuggers, soporte técnico.
- Disponibilidad de microcontrolador en el mercado en el presente y el futuro.

Existen diversos tipos de fabricantes de microcontroladores tal como Microchip, Freescale Semiconductor's (Motolora), Atmel's AVR, Zilog's Z8, etc. Cada fabricante dota al mercado de una serie de microcontroladores de diversas especificaciones técnicas, entre estos tenemos microcontroladores de 8 bit, 16

bits y 32 bits, que en algunos casos estos últimos constituye en modelo híbrido entre un microcontrolador y un DSP (Procesador digital de señales).

En términos de velocidad de procesamiento, uno de los criterios más importantes que se tomaron en cuenta a la hora de elegir el PIC18F4550 tiene que ver con que este es capaz de trabajar a una velocidad de 48 MHz haciendo uso de un PLL interno que se configura según la frecuencia del cristal o resonador de alta velocidad (HS, por sus siglas en inglés). Teniendo en cuenta que este microcontrolador tiene un bus de datos de 8 bits debemos considerar que realizar operaciones de coma flotante (32 bits) puede llevar un tiempo considerable, además que no existe una instrucción dentro de su repertorio que optimice esta operación para lenguajes compilados como C; sin embargo, este si dispone de un multiplicador de 8×8 bits que permite realizar un cálculo muy rápido en tan solo un ciclo de instrucción (Aproximadamente 82.2 ns), característica crucial a la hora de implementar el algoritmo de control difuso.

Dado que el sistema de control de tráfico tiene que gestionar diferentes tareas es necesario disponer de temporizadores y fuentes de interrupción para la programación de eventos y así el microcontrolador pueda realizar todas las tareas con la mínima cantidad de retardos posible. Se requiere también de una Stack (puntero de pila) con los niveles suficientes para que este pueda tener muchas subrutinas anidadas y así el código sea más legible y se reduzca la cantidad de memoria de programa usada.

La memoria de acceso aleatorio (RAM, por sus siglas en inglés) debe ser lo suficientemente grande para almacenar la base de datos del algoritmo de control difuso, además de las variables utilizadas por la etapa de procesamiento de datos y las tareas de comunicación. Como se verá en la sección 6.2.3 la base de reglas consta de 4 matrices de 5×5 , esto demanda una gran cantidad de memoria que estará en función del tipo de dato almacenado (1,8,18,32 bits), nosotros limitamos estos datos a enteros de 8 bits, con el fin de reducir la cantidad de memoria requerida, además, debido a las características de la base de reglas estos datos

en esencia estáticos (dado que la base de reglas no cambia) se pueden almacenar en la memoria de programa (ROM) del microcontrolador y así reducimos de manera considerable el consumo de memoria RAM.

El sistema de control de tráfico debe comunicarse con el simulador de tráfico vehicular mediante una interfaz de comunicación RS-232, también debe hacerlo de manera no simultánea con la unidad de detección vehicular, esto se logra mediante el uso de al menos una UART. Por otro lado, el microcontrolador debe de comunicarse con otro microcontrolador (PIC16F87. Ver sección 2.7.7) para enviar información procesada de tráfico, por ello se necesita de otro modulo comunicación aparte de la UART con la que se logre esto, por lo que se optó usar el módulo MSSP del microcontrolador.

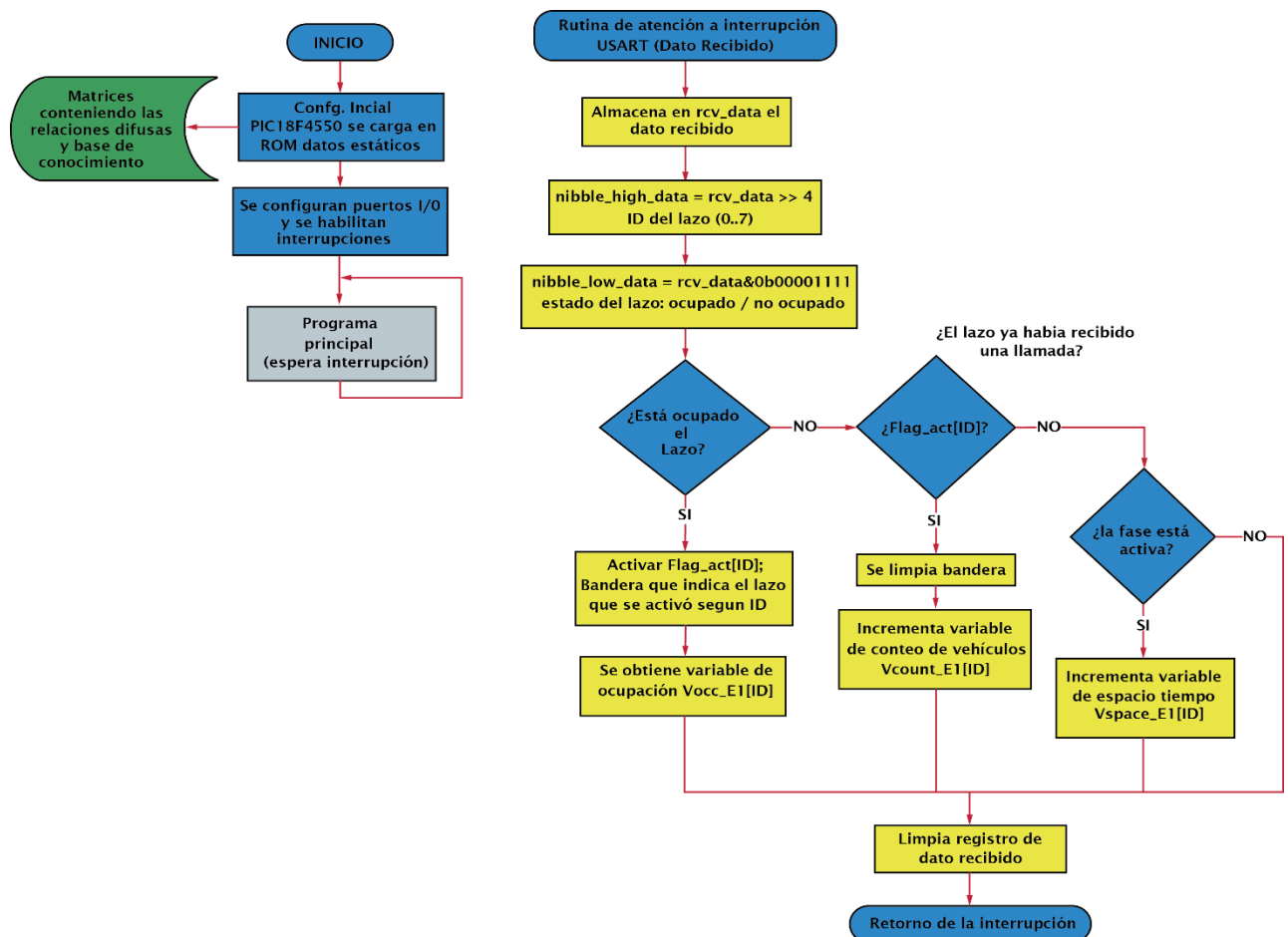
En la tabla 2.3 podemos observar de forma resumida algunas de las características que posee el microcontrolador elegido para la implementación del algoritmo de toma de decisiones difusas.

Tabla 2.3 Características del microcontrolador seleccionado. Tomado de hoja de datos del fabricante.

Característica	PIC18F4550
Frecuencia de operación	DC – 48MHz
Memoria de programa (Bytes)	32768
Repertorio de instrucciones	83
Memoria de datos (Bytes)	2048
EEPROM (Bytes)	256
Fuentes de interrupción	20
Stack (niveles)	32
Puertos E/S	Puertos A, B, C, D, E
Timers	4
Módulos CCP	1
Comunicación Serial	MSSP, EUSART
Modulo USB	1
SPP	Si
Módulo ADC 10 bit	13 canales de entrada
Encapsulado	40 – Pin PDIP 44 – Pin QFN 44 – Pin TQFP
Reinicios (y retardos)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), \overline{MCLR} , WDT

2.8.2 Procesamiento de datos

En la figura 2.24 observamos el flujograma de la subrutina de procesamiento de datos. Primeramente, se carga la configuración inicial al microcontrolador como son: activación de interrupción de TIMER0, USART por dato recibido, la tabla de búsqueda (look-up table) que contiene las relaciones difusas, y algunas constantes que definen la base de conocimiento.



2.24 Flujograma del proceso de adquisición y procesamiento de datos.

Como se describió en la sección 6.1.1 el escenario de tráfico consta de 8 lazos a los cuales se le asigna una dirección que va desde el número decimal 0 al 7, el controlador de tráfico vehicular se encarga de “preguntar” (polling) a la unidad de detección el estado de cada lazo, para ello cada 20 ms se tiene un timer que se desborda, entrando a una subrutina de atención a interrupción que se encarga de transmitir un dato de 1 byte que contiene la dirección del lazo encuestado. Al tener un total de 8 lazos se deduce que cada lazo será encuestado aproximadamente cada 160 ms, este es un dato crucial ya que por ese periodo se desconocerá el estado de un lazo que ya fue encuestado, sin embargo, teniendo en cuenta la velocidad a la que se desplaza un vehículo y el espaciamiento mínimo que debe existir entre vehículos este tiempo es lo suficientemente corto como para evitar errores en el conteo (flujo vehicular).

Una vez el controlador pregunta a la unidad de detección el estado de un lazo en particular, la unidad de detección se encarga de enviarle 1 byte, conteniendo en el nibble alto la confirmación de la dirección del lazo, y en el nibble bajo el estado del lazo que puede ser: ocupado o no ocupado (ver figura 2.24). Si la unidad de detección vehicular le informa al controlador que sobre el lazo en cuestión hay una llamada, la subrutina de procesamiento se encarga de incrementar el tiempo de ocupación del lazo, pero no el conteo ya que el vehículo aún no ha atravesado por completo la zona de detección. En caso de que la unidad de detección informe que el lazo no está ocupado, el algoritmo primeramente pregunta si anteriormente el lazo en cuestión ya había tenido una llamada, en ese caso, eso significa que un vehículo ha atravesado el lazo la unidad de detección y se incrementa una variable de conteo indexada según la dirección del lazo. En caso que no se haya dado una llamada anteriormente sobre el lazo encuestado, se pregunta al controlador de señales si la fase activa corresponde a la del lazo que se ha encuestado, en caso afirmativo se incrementa la variable de espacio tiempo que en el programa principal sirve para calcular la capacidad no usada de la intersección según la fórmula 2.2, si el lazo encuestado no corresponde a uno que en ese momento tiene una fase activa simplemente se ignora la no presencia y se retorna al programa principal.

$$DS = \frac{G - T_s + n * T_{FM}}{G} \quad \text{Fórmula 2.2}$$

Donde:

G = Tiempo total disponible para la fase activa

T_s = Espacio tiempo total durante una fase activa

n = Número de vehículos que han pasado sobre la fase activa.

T_{FM} = Espacio tiempo total cuando el flujo vehicular es máximo (valor estimado según el manual de capacidad de carreteras).

DS = Grado de saturación estimado según Akcelik (1997).

Como se mencionó en la sección 1.4.10 el grado de saturación es una variable que se utiliza para el análisis de intersecciones semaforizadas como indicador del nivel de servicio, este relaciona la capacidad de un segmento de la carretera con respecto a la demanda y sus parámetros de temporización y asignación de fase. El manual de capacidad para las carreteras en su edición 2000 presenta la fórmula 1.4 y 1.5 para su cálculo, sin embargo, la mayoría de datos necesarios requieren de intervalos de análisis bastantes largos (aproximadamente 1 hora), y dada la naturaleza del algoritmo de procesamiento de datos, la información que se recibe a través de los lazos inductivos y el esquema de control ciclo a ciclo (intervalo relativamente corto; no mayor a 130 segundos) resulta poco confiable lograr interpolar los datos de manera que se obtenga una aproximación en intervalos mucho más pequeños. Akcelik (1997) propone un método aproximado y compara los valores obtenidos con su método y el valor calculado usando la fórmula 1.5. El método de Akcelik resulta más conveniente para sistemas que basan su algoritmo de control en termino de variables microscópicas y además las pruebas en sitios reales muestran que su método da resultados muy similares al propuesto por el manual de capacidad de carreteras. En la tabla 2.4 podemos observar el resultado de algunas pruebas de campo realizadas por Akcelik donde logra apreciar el valor de grado de saturación que se calcular con su método y el que recomienda el manual de capacidad para las carreteras, como se observa el método

desarrollado por Akcelik es muy confiable ya que presenta un porcentaje de error no mayor del 2.1% para situaciones de bajo volumen vehicular y una subestimación del 3.8% para situaciones de alto volumen vehicular.

Tabla 2.4 Valores de grado de saturación para distintos niveles de grado de saturación. DS: método aproximado, x: método propuesto por HCM (2000). Tomado de Akcelik (2000).

Caso	Verde efectivo (seg)	DS	X	DIF %
Bajo x	70	0.542	0.530	2.1
Medio x	55	0.685	0.675	1.6
Alto x	44	0.845	0.844	0.2
Sobre saturado	36	1.031	0.992	-3.8

2.8.3 Algoritmo de toma de decisiones difuso

El algoritmo de control de tráfico hace uso de la teoría de conjuntos difusos para tratar de manera sistemática la imprecisión inherente causada por los elementos electrónicos usados para medir el escenario de transporte y la ambigüedad con la que estos datos pueden ser interpretados al momento de inferir una decisión de naturaleza objetiva.

Al momento de diseñar el algoritmo de toma de decisiones difuso se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones (Ross, 2010, p. 441):

- La planta es observable y controlable: se dispone de elementos que son capaces de medir la condición actual de tráfico. Los estados y las salidas del proceso de control están disponibles para su observación o medición.
- Existe un operador humano experto que es capaz de declarar una serie de reglas lingüísticas significativas para cumplir los objetivos del sistema de control. En otro caso, se dispone de la literatura necesaria para poder adquirir este conocimiento, combinado con el sentido común y si de disponen, medidas de campo.
- Existe una solución.

- Se busca una solución lo “suficientemente buena”, no necesariamente la óptima.
- Los problemas de estabilidad son tratados de manera explícita mediante el uso de un simulador de tráfico microscópico y el controlador implementado sobre un microcontrolador PIC18F4550.

El uso de la lógica difusa nos permite el diseño de un controlador altamente flexible (que se ajusta a distintos escenarios de tráfico sin necesidad de modificar sus parámetros) y además de naturaleza multi-objetiva. Esto se logra mediante la elaboración de una serie de reglas difusas que expresan de manera cualitativa en términos del “lenguaje natural” el conocimiento experto para controlar el proceso de asignación de derecho de paso en una intersección (reglas difusas), con elementos del tráfico microscópico recolectado por lazos inductivos colocados cerca de la línea de parada. Los objetivos que persigue el algoritmo de control de tráfico difuso son:

- Maximizar el grado de saturación: Con esto se garantizará que el tiempo asignado a una fase está siendo el necesario para satisfacer la demanda actual, dado como resultado una reducción en el tiempo que la luz permanece en verde cuando no hay suficiente demanda.
- Reducir el ciclo de tiempo para bajo volumen de tráfico: en situaciones de bajo volumen es conveniente tener control sobre el ciclo; la optimización se da en términos de la reducción del tiempo de espera promedio
- Incrementar el ciclo de tiempo para volúmenes de tráfico alto: cuando el volumen de tráfico es alto, la optimización se realiza en términos de la reducción del número de paradas.
- Igualar el grado de saturación en cada acceso: con esto se garantiza que el tiempo asignado a cada fase se distribuye de manera “justa” ajustándose a la situación de tráfico de una manera global.

A partir de los objetivos planteados se diseña la base de conocimiento y las reglas difusas que llevarán a alcanzar estos objetivos. Ya que se debe tener control sobre

el ciclo y la fase se requiere de un controlador que tenga una base de reglas que decida en cada cambio de ciclo en qué porcentaje se variará el ciclo para alcanzar los objetivos propuestos, y otra base de reglas que decida en qué porcentaje se variará la fase para alcanzar grados de saturación equitativos en cada acceso de la intersección propuesta.

El grado de saturación es la variable utilizada para llevar a cabo el proceso de toma de decisiones, para ello se mide esta variable en los ocho accesos por donde los vehículos pueden arribar y se calcular el grado de saturación crítico, correspondiente al grupo de señales que tiene derecho de paso. Se toma en cuenta el grado de saturación para grupos de señales que presentan características opuestas, pero que siguen movimientos ya sea hacia el frente (recto) o de giros a la izquierda. Lo anterior nos permite implementar un controlador para 4 fases sin que haya un aumento considerable en la complejidad en la elaboración de la base de reglas, ya que tenemos un controlador para movimientos que van de este-oeste (recto), norte-sur (recto), y otro controlador exclusivamente para los giros. En la tabla 2.5 se presenta las variables lingüísticas utilizadas por el algoritmo de toma de dediciones difuso, los conjuntos difusos y su universo de discurso.

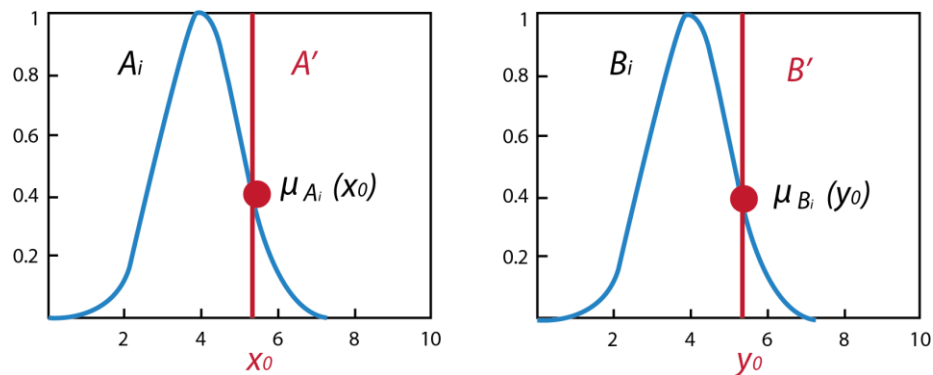
Tabla 2.5 Características de los conjuntos difusos.

Variable lingüística	Conjuntos difusos	Universo de Discurso	
		Límite inferior	Límite superior
Grado de saturación (W-E/E-W)	DS bajo	$-\infty$	0.29
	DS Medio	0.14	0.54
	DS bueno	0.39	0.64
	DS alto	0.54	0.9
	DS muy alto	0.74	∞
Grado de saturación (N-S/S-N)	DS opuesto bajo	$-\infty$	0.29
	DS opuesto medio	0.14	0.54
	DS opuesto bueno	0.39	0.64
	DS opuesto alto	0.54	0.9
	DS opuesto muy alto	0.74	∞

2.8.3.1 Fusificación

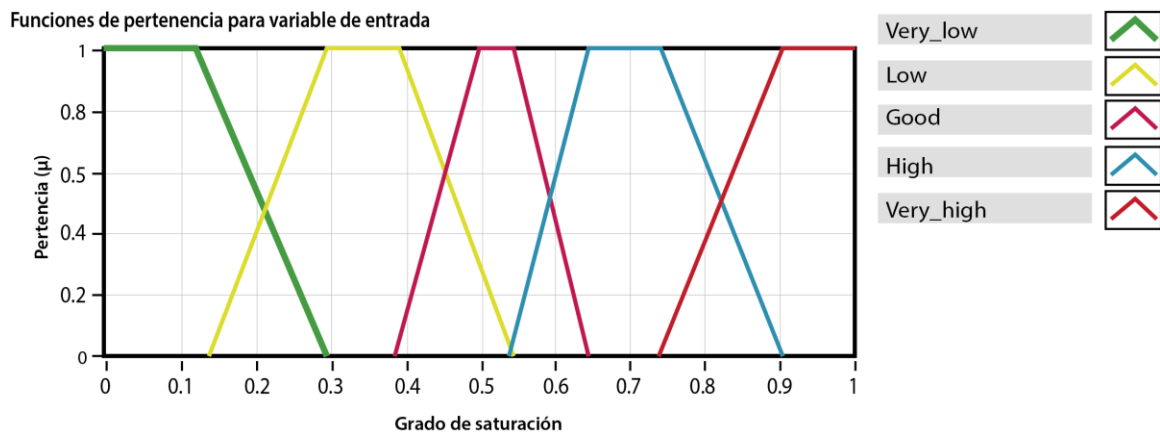
Como se muestra en la figura 2.17 el controlador consta de una etapa de fusificación encargada de convertir datos cuantitativos recolectados por los sensores de lazo inductivo a datos de naturaleza cualitativa, describiéndolos en términos lingüísticos mediante la asignación de un grado de pertenencia a una cualidad difusa. Para fusificar las entradas primeramente se discretiza el universo de discurso de las variables lingüísticas, esto se hace con el fin de ahorrar recursos en términos de la memoria utilizada por el microcontrolador; el grado de saturación se discretiza dentro de un intervalo entero que va de 0 - 100, el algoritmo de procesamiento de datos se encarga de convertir el valor del grado de saturación de coma flotante a un número discreto que toma valores dentro del intervalo mencionado. La estrategia de fusificación utilizada se basa en que el valor “crisp” de grado de saturación corresponde un conjunto de tipo singleton, por tanto, el producto cartesiano entre el conjunto difuso correspondiente y el conjunto singleton es cero excepto para el punto x_0 y y_0 (ver figura 2.25), en esta situación tenemos que el valor de pertenencia de la relación difusa será distinto de cero y corresponderá al valor mínimo entre 1 y $\mu_{A_i}(x_0)$, lo que nos lleva a la conclusión que $x_0 = \mu_{A_i}(x_0)$, por tanto, el proceso de fusificación en nuestro caso no es más que una simplificación de una relación difusa entre el conjunto singleton visto como la situación de tráfico medida y un conjunto difuso definido.

$$A' = \{x_0\} \text{ y } B' = \{y_0\} \quad \text{Fórmula 2.3}$$



2.25 Fusificación tomando como conjunto singleton el valor de entrada “crisp”. El producto cartesiano corresponde al valor fusificado. (Elaboración propia).

El conjunto A' (valor de grado de saturación medido) corresponde a un conjunto difuso cercano a A_i y describe el estado actual del tráfico mediante el grado de saturación; x_0 e y_0 son los valores de grado de saturación medidos expresados como conjuntos tipo singleton. Los conjuntos difusos utilizados para describir de manera cualitativa el grado de saturación son presentados en la figura 2.26. Estos se elaboraron basándonos en la relación que existe entre el tiempo de espera promedio y el grado de saturación, sin embargo, en el proceso de diseño cada conjunto difuso se modificó de manera sistemática para que se cumplieran los objetivos planteados anteriormente. Ya que se desea que el tráfico progrese de una manera suave, esto es, sin que haya cambios bruscos en la corriente vehicular se utilizan funciones trapezoidales para que indicar que bajo ciertos intervalos la interpretación difusa puede mantenerse sin cambios, de manera que las modificaciones en los parámetros de optimización sean leves y no existan aumentos bruscos de tiempo, que puede ocasionar incremento en la cola de vehículos que posiblemente sean muy difíciles de disipar.



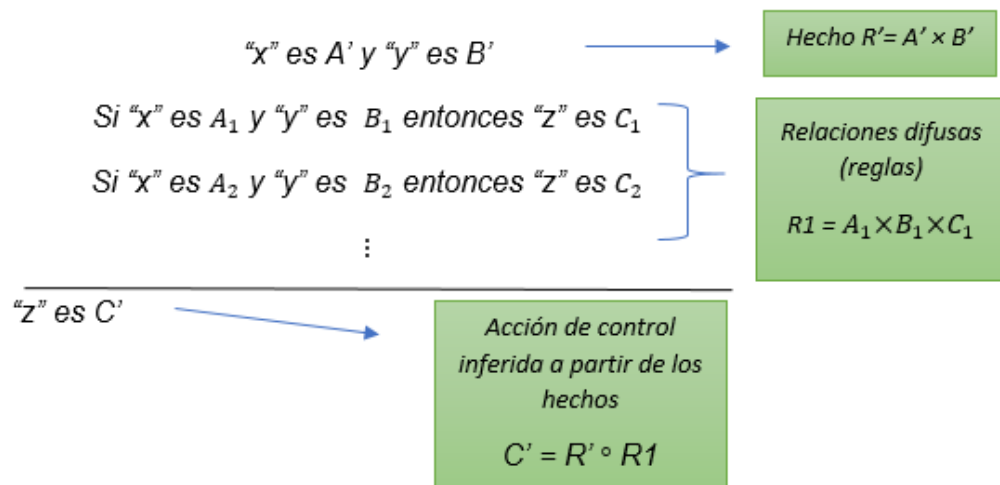
2.26 Funciones de pertenencia para la variable lingüística “grado de saturación”.
(elaboración propia).

No existe una metodología que nos garantice que el controlador difuso cumplirá de manera óptima los objetivos propuestos. La elaboración de las funciones de pertenencia son de crucial importancia ya que estas determinan la semántica de la base de reglas. Con el uso de redes neuronales se puede modificar en tiempo real los parámetros que definen los conjuntos difusos y con ello la semántica de las

reglas difusas, logrando controladores más adaptativos y flexibles. Sin embargo, tal asunto está fuera del alcance de esta tesis, y por tal motivo nos limitamos a elaborar las funciones de pertenencia siguiendo los conceptos de teoría de tráfico vehicular en intersecciones señalizadas, la prueba y error y el sentido común.

2.8.3.2 Mecanismo de inferencia tipo Mamdani

El mecanismo de inferencia tipo Mamdani es una generalización de la regla de inferencia modus ponens usado en la lógica clásica (Ross, 2010, p.118). Su uso resulta conveniente en términos de requerimiento computacional ya que es muy sencillo debido a que se basa en la regla composicional de inferencia difusa que no es más que realizar operaciones de multiplicación, encontrar máximos y mínimos entre dos o más números (Jang, Sun, & Mizutani, 1997, p. 47). El mecanismo de inferencia de Mamdani se expresa de forma lingüística como sigue:



2.27 Mecanismo de inferencia de Mamdani. El conjunto C' resulta de la composición entre el hecho y la regla difusa. (elaboración propia).

El objetivo del método de inferencia es encontrar las características del conjunto C' a partir de los hechos, que en nuestro caso sería la situación de tráfico en términos del grado de saturación medido. El valor del grado de saturación para accesos que presentan movimientos conflictivos es fusificado y un algoritmo de "activación de reglas" es implementado para saber que reglas se activarán en

función de la situación de tráfico en particular. Las reglas pueden ser vistas como una relación difusa ternaria entre los espacios difusos A_1, B_1, C_1 , esta relación difusa establece una acción de control “clara” (prototipo) para una situación en particular, por ejemplo:

“si el grado de saturación de norte a sur es muy bajo y el grado de saturación de este a oeste es alto entonces la variación en el ciclo es de cero y la variación en la fase es positiva grande”

La expresión lingüística anterior es una de las reglas difusas implementadas en el algoritmo de control de tráfico. La composición entre esta regla y un hecho en particular (valores de grado de saturación medido) darán como resultado el conjunto C' inferido. Este procedimiento se lleva a cabo de la siguiente manera dentro del algoritmo:

$$C' = (A' \times B')^\circ (A \times B \rightarrow C)$$

$$\mu_{C'}(z) = \bigvee_{x,y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y) \wedge \mu_{Ai}(x) \wedge \mu_{Bi}(y) \wedge \mu_{Ci}(z)]$$

$$= \{ \bigvee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{Ai}(x)] \} \wedge \{ \bigvee_y [\mu_{B'}(y) \wedge \mu_{Bi}(y)] \} \wedge \mu_{Ci}(z)$$

Dado que $\mu_{A'}(x)$ y $\mu_{B'}(y)$ son conjuntos singleton correspondiente a los hechos

$$\bigvee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{Ai}(x)] = \mu_{Ai}(x_0) \text{ y } \bigvee_y [\mu_{B'}(y) \wedge \mu_{Bi}(y)] = \mu_{Bi}(y_0)$$

El conjunto difuso C' inferido según el método de inferencia Mamdani será:

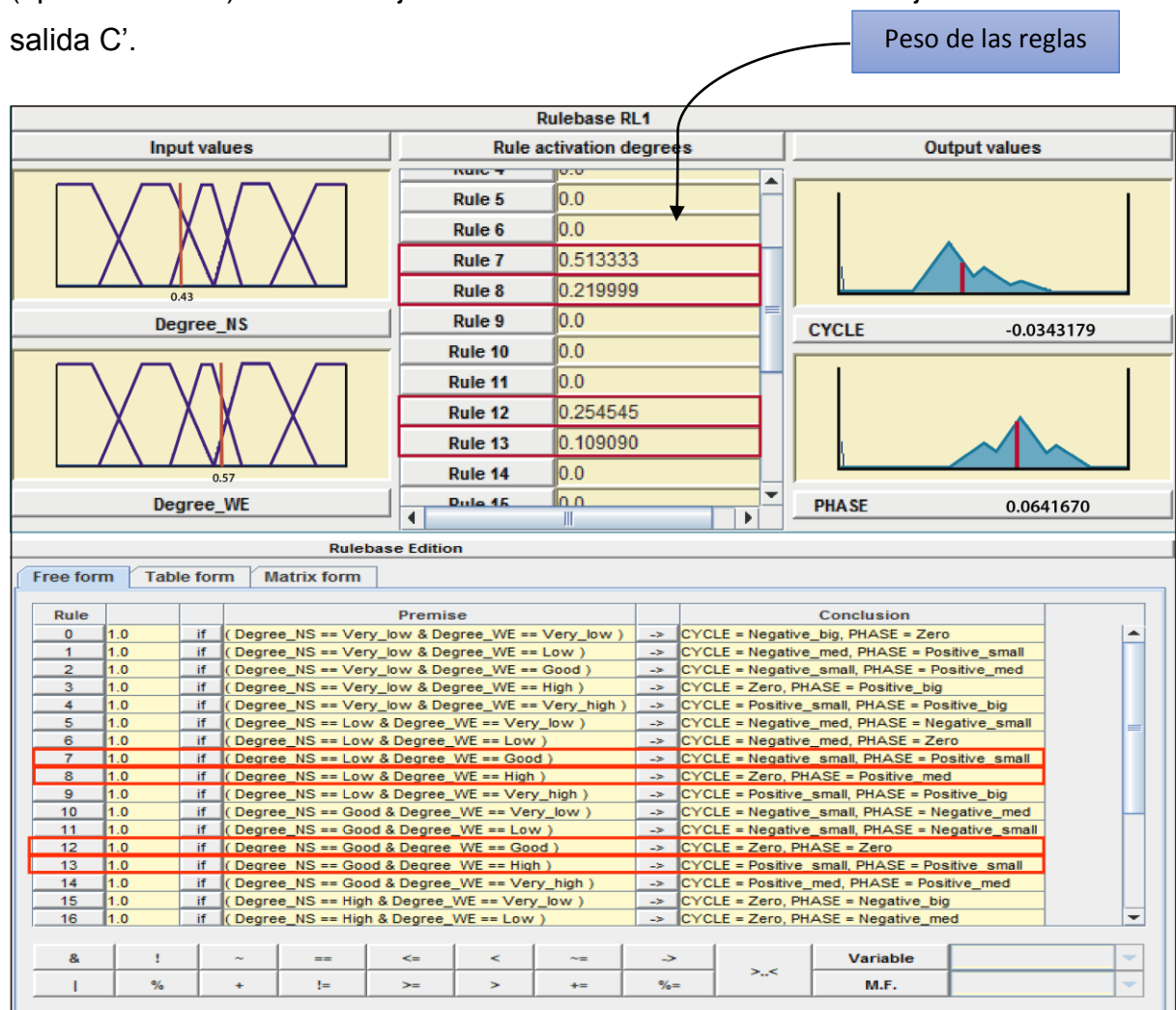
$$\mu_{C'}(z) = \min[\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0), \mu_{Ci}(z)] \quad \text{Fórmula 2.4}$$

Como se observa de forma matemática el método de inferencia Mamdani corresponde a calcular el mínimo de los valores fusificados para los hechos y al final el conjunto difuso de salida $\mu_{Ci}(z)$ es recortado en $\min[\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0), \mu_{Ci}]$.

El operador min que se observa en la fórmula 2.4 puede ser sustituido por cualquier operador de la T-norma (Jang, Sun, & Mizutani, 1997, p. 37). Para fines

de ahorro de recursos usamos el producto algebraico como operador de intersección en lugar del mínimo.

La inferencia de Mamdani implementada en esta tesis se presenta de manera gráfica en la figura 2.28. En ella podemos observar que la estructura de la base de reglas está formada por dos antecedentes y dos consecuentes, en primer lugar, se calcula el valor de pertenencia a cada conjunto difuso dado un valor del grado de saturación en cada acceso, de estos se obtiene el producto algebraico y el conjunto difuso de salida implicado es escalado hasta una altura $\mu_{Ai}(x_0) \cdot \mu_{Bi}(y_0)$. Dado que en el proceso de inferencia se activa más de una regla, la unión (operación max) de los conjuntos difusos escalados será el conjunto difuso de salida C'.



2.28 Inferencia tipo Mamdani con operador T-norm de producto algebraico. (captura de pantalla del software Xfuzzy).

2.8.3.3 Base de reglas difusas

La base de reglas se elaboró basándonos en la revisión de literatura expuesta en el marco teórico, y en particular a partir de los trabajos de investigación expuestos por Akcelik sobre la operación y gestión de los sistemas de control de tráfico actuado, coordinados y no coordinados. De igual manera, la base de reglas se construyó teniendo en mente siempre los objetivos expuestos en la sección 2.2.3. Se elaboró una base de reglas para calcular el porcentaje de variación en el ciclo y otra para calcular el porcentaje de variación en la distribución del tiempo que se le da a cada fase. En la tabla 2.6 se presentan las reglas usadas por el sistema de control de tráfico para optimizar los parámetros antes mencionados basado en el grado de saturación medido en cada movimiento conflictivo.

Tabla 2.6 Base de reglas difusas para el porcentaje de cambio en el ciclo y para la división de fase.

		Grado de saturación de Este - Oeste				
		Very.low	low	good	high	Very.high
Grado de saturación de Norte - Sur	Very.low	C-n.big P-zero	C-n.med P-p.sml	C-n.sml P-p.med	C-zero P-p.big	C-p.sml P-p.big
	low	C-n.med P-n.sml	C-n.med P-zero	C-n.sml P-p.sml	C-zero P-p.med	C-p.sml P-p.big
	good	C-n.sml P-n.med	C-n.sml P-n.sml	C-zero P-zero	C-p.sml P-p.sml	C-p.med P-p-med
	high	C-zero P-n.big	C-zero P-n.med	C-p.sml P-n.sml	C-p.big P-zero	C-p.big P-p.sml
	Very.high	C-p.sml P-n.big	C-p.sml P-n.big	C-p.med P-n.med	C-p.big P-n.sml	C-p.big P-zero

C = cambio en el ciclo
P = cambio en la división de fase

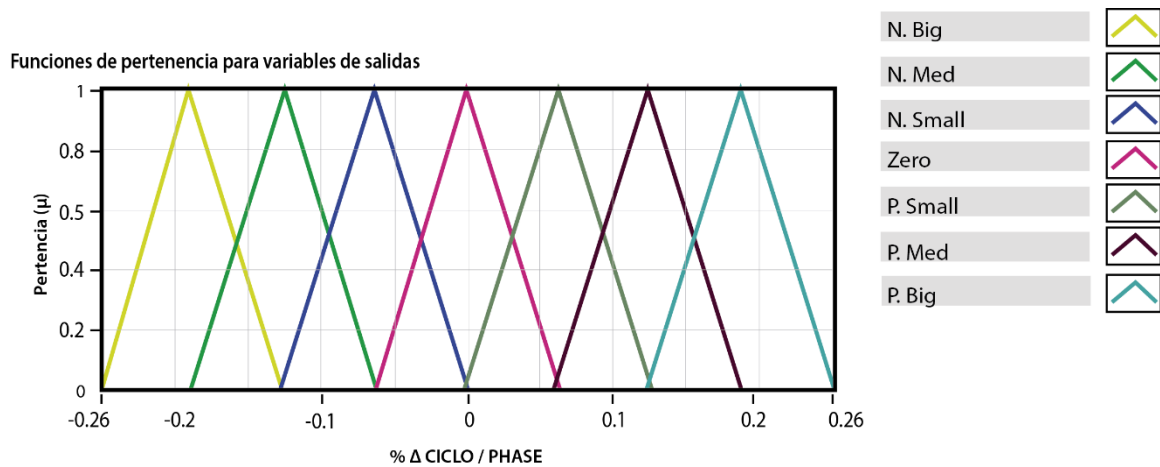
2.8.3.4 Defusificación

Como se mencionó en la sección 2.2.3.2 el proceso de inferencia tiene como fin encontrar el conjunto difuso resultante a partir de hechos y relaciones ya establecidas en una base de reglas. Sin embargo, para nuestro propósito este tipo de salida (conjunto difuso) no resulta conveniente, ya que requerimos de una

cantidad precisa para que en esta medida sean modificados tanto el ciclo como la fase, por tanto, es necesario obtener un valor numérico que represente de la mejor manera la conclusión expuesta por el conjunto difuso de salida $\mu_{C'}(z)$, a este proceso se le conoce como defusificación.

En términos de tiempo de ejecución, podemos decir que el proceso de defusificación, es el que más consume recursos al momento de ser implementado. El tiempo que tarda el microcontrolador en efectuar una inferencia difusa (desde la fusificación hasta la defusificación) está en función de la cantidad de reglas que se activan, a mayor cantidad de reglas activadas mayor será el tiempo que consumirá el algoritmo de inferencia difusa para llevar a cabo el proceso de defusificación. El número de reglas activadas depende en gran medida como se traslapan los conjuntos difusos para las variables de entrada, es por esta razón que dichos conjuntos se diseñaron de manera tal que el máximo número de reglas que se pueden activar sean cuatro, esto reduce el tiempo de consumo de la etapa de defusificación y del algoritmo de inferencia difusa en general.

En la figura 1.11 se presentan distintos métodos de defusificación, pero entre estos decidimos elegir el método del centroide dado que según la revisión bibliográfica este presenta transiciones más suaves entre cambios pequeños de las variables de entrada, lo cual es lo que andamos buscando, como ya hemos mencionado, el algoritmo de control debe variar los parámetros de temporización de una manera suave, para que el tráfico vehicular progrese de esta manera. En la figura 2.12 observamos que el conjunto $\mu_{C'}(z)$, corresponde a la unión de los conjuntos escalados dada las reglas activadas, método del centroide lo que hace simplemente es calcular el valor de centro de gravedad dado el área del conjunto resultante. Este proceso puede ser simplificado si se tienen conjuntos de salida Z triangulares simétricos, a como se muestran en la figura 2.29.



2.29 Conjuntos difusos de salidas simétricos para la variación de ciclo y fase.
(elaboración propia).

La fórmula 2.5 calcula el centro de masa del conjunto $\mu_{c'}(z)$ utilizando solamente el valor al que es escalado el conjunto de salida para la regla activada b_i y el área bajo el triángulo simétrico del conjunto inferido $\int u(i)$.

$$u_{crisp} = \frac{\sum_i b_i \int u(i)}{\sum_i \int u(i)} \quad \text{Fórmula 2.5}$$

La integral $\int u(i)$ correspondiente al área del conjunto difuso inferido puede ser calculada de una forma muy sencilla, ya que los conjuntos difusos de salidas son triangulares y simétricos, podemos calcular el área como sigue (ver formula 2.7):

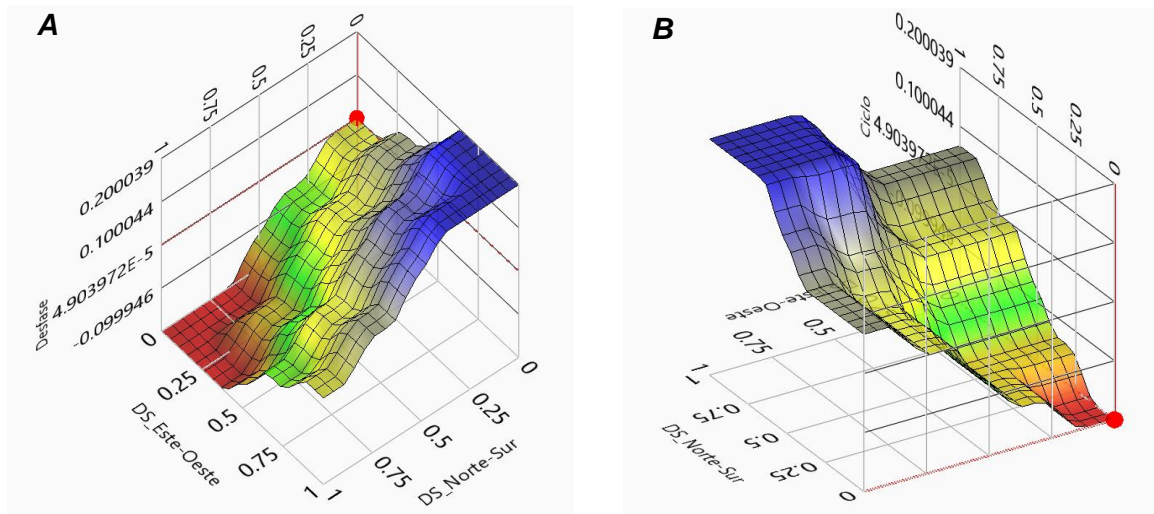
$$\int u(i) = \omega \left(h - \frac{h^2}{2} \right) \quad \text{Fórmula 2.7}$$

Donde:

ω = ancho total de la base del conjunto difuso

h = altura a la cual el conjunto difuso es cortado

El proceso de defusificación da como resultado un valor “crisp”, la relación entre este valor de salida defusificado y el valor de entrada puede ser graficada, dando como resultado una superficie de control como se muestra en la figura 2.30.



2.30 A) superficie de control para el porcentaje de cambio en la división de fase. B) superficie de control para el cambio de ciclo.

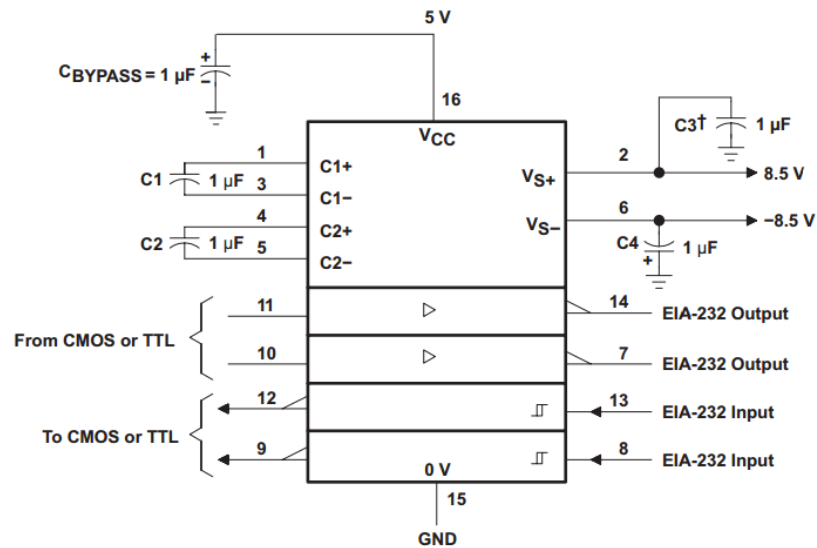
controlador difuso en el proceso de toma de decisiones, además podemos observar que la superficie del ciclo es menos plana que la de la variación en la fase, esto supone que el ciclo incrementará de manera más brusca que la fase, esta característica es deseable ya que el ciclo afecta de manera global a todas las fases, y la división de fase no es más que una fracción de este ciclo. Grados de saturación altos requiere un incremento más brusco, sin alterar la porción que se le asigna a cada fase, es decir, en este caso se trata de aliviar la congestión solamente incrementando el ciclo, sin variar la porción que se le asigna a cada fase. Por otro lado, para una fase en particular y sin condiciones de tráfico congestionada un grado de saturación alto puede ser “aliviado” de manera local, variando solamente el porcentaje del ciclo que se le asigna a esa fase sin alterar el ciclo de tiempo, y con ello sin incrementar la demora promedio. La figura 2.30 y la tabla 2.4 muestran la correlación que hay entre las acciones de control, la modelación heurística del sistema con los objetivos que persigue el sistema de control de tráfico.

2.8.4 Comunicación RS-232

El sistema de control de tráfico vehicular hace uso del estándar RS-232 para comunicarse con una computadora donde se simula el sistema de tráfico vehicular propuesto en esta tesis, esto con el fin de probar la efectividad del sistema en términos de la flexibilidad y el cumplimiento del objetivo general propuesto. Dado que no existen procedimientos analíticos claros para realizar un análisis de la estabilidad de un sistema difuso, utilizamos un esquema hardware-in-the-loop (ver sección 1.6.5) para comprobar lo expuesto.

El microcontrolador PIC18F4550 tiene incorporada un módulo USART que facilita la implementación de una comunicación serial half-duplex requerida para el intercambio de datos entre el software simulador y la unidad de detección con lazo inductivo. Debido a que el estándar RS232 no es compatible con los microcontroladores en términos de niveles de tensión, es necesario añadir un driver de línea (convertidor de voltaje) para convertir las señales TTL provenientes del microcontrolador a señales RS232 aceptables por una computadora personal. Para tal fin hacemos uso del MAX232 de Maxim Corp. El Max232 convierte voltajes desde niveles RS232 (-12 V/+12 V) a voltajes TTL y viceversa. La ventaja que presenta este driver es que a partir de solamente una fuente de +5V y cuatro capacitores es capaz de elevar la tensión hasta los niveles estándar el RS232, y con ello se evita añadir fuentes simétricas que pueden ocupar mucho espacio a la hora de montar el sistema.

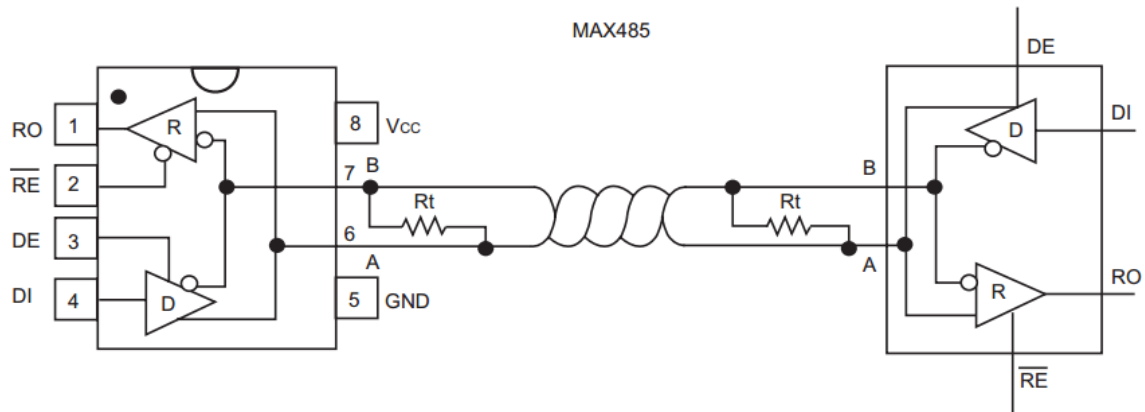
En la figura 2.31 podemos observar el diagrama eléctrico para la aplicación típica del MAX232, como vemos haciendo uso de solamente cuatro condensadores de 1uF podemos elevar la tensión hasta los niveles requeridos por el estándar RS232 para poder establecer la comunicación con la computadora donde reside el simulador de tráfico vehicular.



2.31 Aplicación típica del MAX232. Tomado de: <http://www.alldatasheet.com>

2.8.5 Comunicación RS-485

Debido a la característica geométrica de las intersecciones señalizadas por semáforos es común encontrar que la infraestructura donde se instala el semáforo está un poco alejada de los puntos en los que el tráfico arriba (unos cuantos cientos de metros), por este motivo la comunicación serial siguiendo el estándar RS232 se vuelve poca robusta, sobre todo si tenemos en cuenta que la tasa máxima de transferencia para nuestro caso es de 9,600 bits por segundo. Es por este motivo que se implementa una red RS485 siguiendo el protocolo de datos de la transmisión asíncrona proporcionada por la USART del microcontrolador; esto es, el nivel lógico 1 es transformado a una señal diferencia entre los puntos A y B que tendrá una polaridad positiva con respecto a B. por otro lado, el cero lógico es una señal diferencia que será negativa con respecto a B. Para implementar esta red se hace uso de los drivers MAX485 y su diagrama eléctrico es presentado en la figura 2.32.



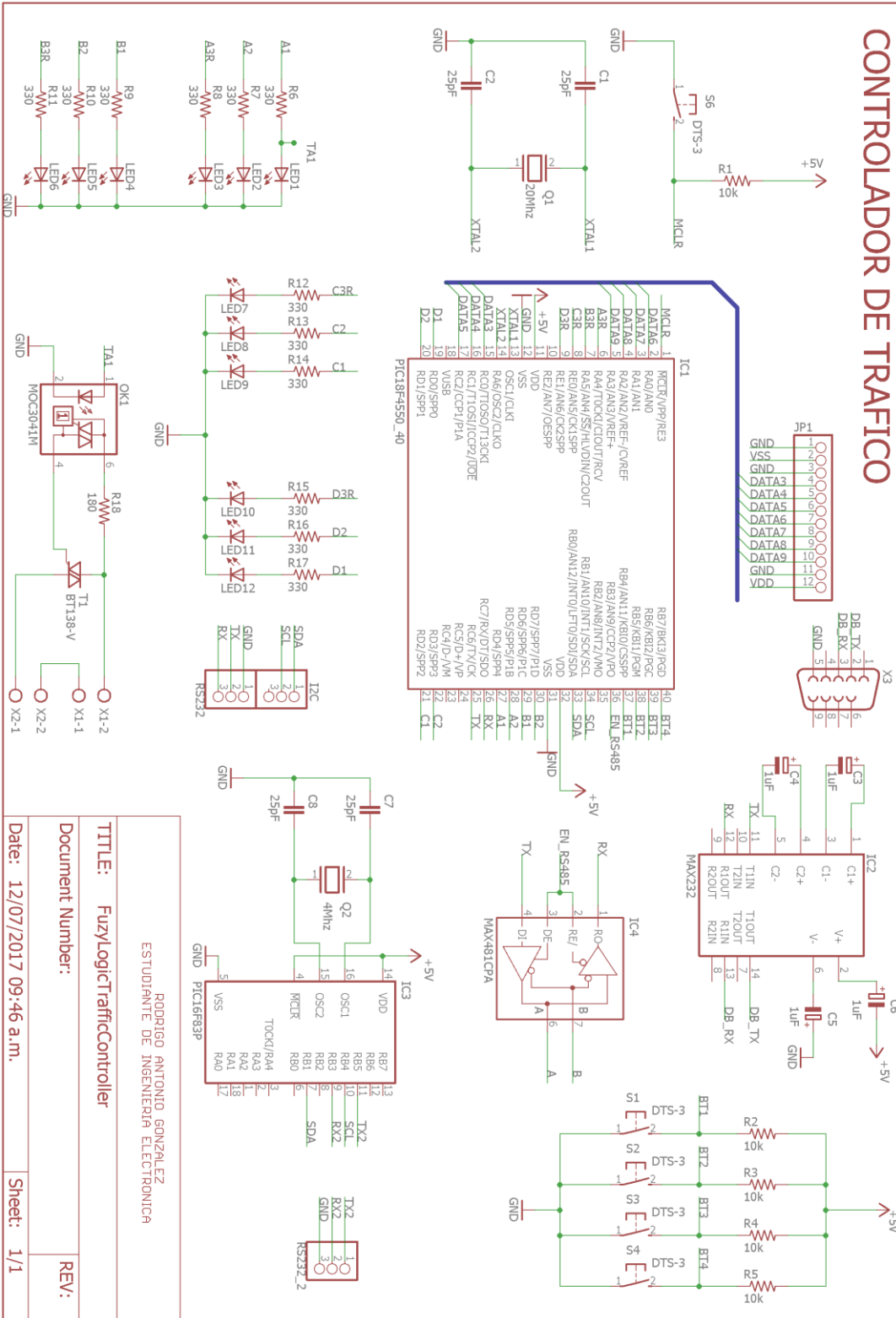
2.32 Aplicación típica del MAX485. Tomado de: <http://www.alldatasheet.com>

2.8.6 Envío de datos vía I2C

El sistema de control de tráfico vehicular difuso envía cada minuto la información recolectada de los lazos inductivos, la naturaleza y la importancia de los datos será abordada más adelante. Los datos que se envían cada minuto corresponden a la suma de vehículos que han atravesado el lazo completamente, así como el tiempo que los vehículos estuvieron sobre el lazo expresado como un porcentaje del tiempo total. De igual manera el sistema envía datos sobre el estado de la fase cada vez que ocurre un cambio de luces, éste informa sobre el nivel de congestión, el ciclo y el tiempo que se asigna a cada una de las fases.

El envío de datos se da mediante una comunicación síncrona de dos líneas siguiendo el protocolo I2C cuyo módulo es incorporado en el PIC18F4550, lo cual facilita su implementación. El controlador se comunica con un PIC16F87 que actúa como esclavo, y es este último microcontrolador es el que se encarga de enviar la información al módem vía SMS.

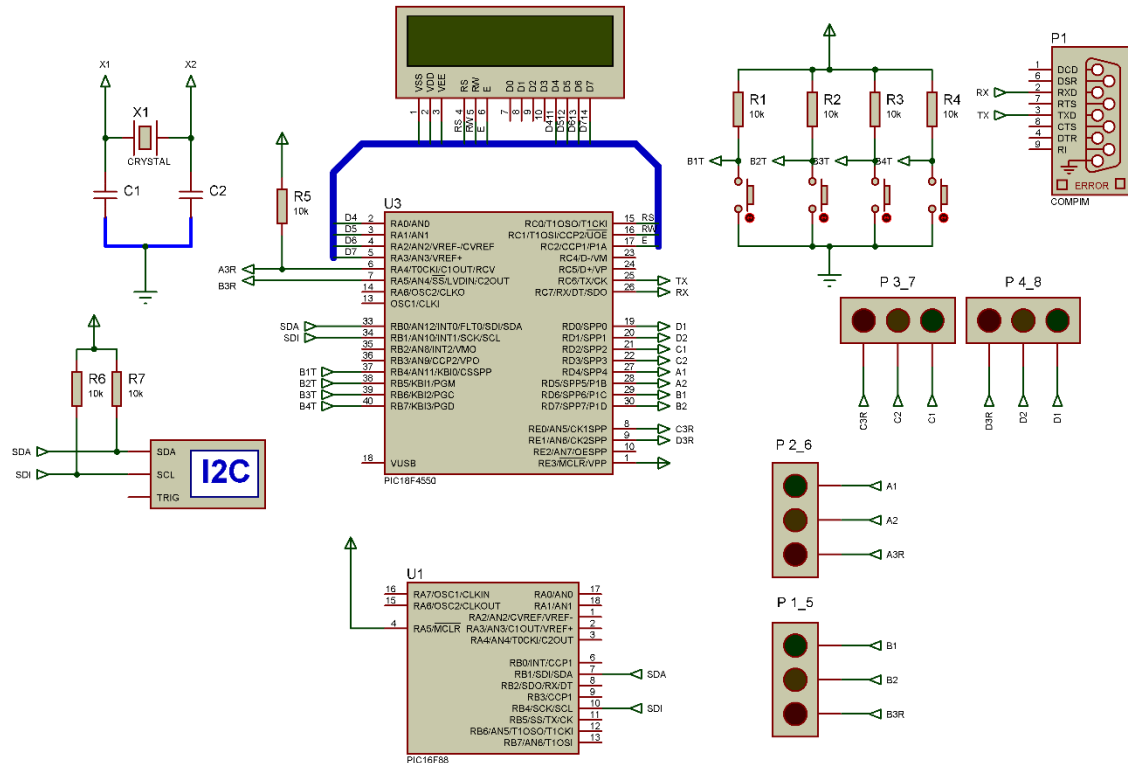
2.8.7 Diagrama esquemático



2.33 Diagrama esquemático el sistema de control de tráfico vehicular.

2.8.8 Simulación

La simulación del controlador de tráfico vehicular se realizó haciendo uso del simulador de circuitos electrónico interactivo Proteus (ver figura 2.34).



2.34 Sistema de control de tráfico vehicular difuso.

En el proceso de diseño se utilizó la herramienta “debugger” incorporada en Proteus con el fin de reducir los errores al momento de programar o realizar correcciones en la lógica del programa, así como errores de compilación, sobre todo al momento de gestionar los recursos del microcontrolador. En conjunción con el simulador de tráfico vehicular se obtuvo una simulación completamente virtual, esto nos permitió realizar ajustes en los parámetros de diseño del sistema de control difuso, modificando mediante prueba/error los parámetros de las funciones de pertenencia, así como la estructura de la base de reglas.

2.9 Simulación del sistema de transporte vehicular

Con el fin de comprobar la efectividad del sistema de control de tráfico vehicular descrito en la sección anterior, se decidió hacer uso de la simulación de tráfico microscópica ya que la instalación de este tipo de sistemas debido al gran impacto en términos de seguridad es muy complicada surgiendo restricciones políticas, sociales económicas que se presentaron al momento de querer encaminar al proyecto hacia su instalación. Mediante la simulación podemos comprobar de manera muy efectiva, barata y confiable la flexibilidad, confiabilidad y robustez del sistema de control de tráfico y además de corroborar que los objetivos planteados en esta tesis se cumplen de manera bastante clara.

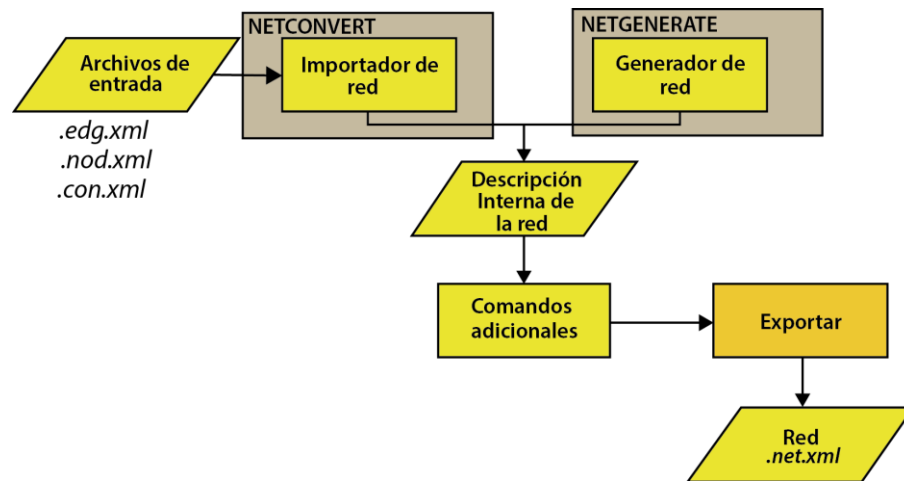
Se hace uso del simulador de tráfico microscópico de código abierto SUMO ya que los modelos de flujo vehicular, así como sus modelos de movilidad están muy bien fundamentados desde un punto de vista físico/matemático, además el hecho de ser de código abierto supone que cuenta con una amplia comunidad de desarrollo. SUMO sigue el modelo car-following permitiendo modelar de manera individual características únicas para cada vehículo dentro del escenario de tráfico. Su enfoque multimodal permite la modelación de distintos tipos de vehículos (composición vehicular), además mediante TRACI (traffic control interface) es posible modificar en tiempo de ejecución parámetros como la temporización de los semáforos, añadir un vehículo de emergencia, la secuencia de fase de los semáforos y obtener información de lazos inductivos, calles y líneas mediante el intercambio de información siguiendo el protocolo TCP/IP .

2.9.1 Construcción del escenario estático

En SUMO el escenario estático (calles, intersecciones, conexiones, semáforos) se construye dentro de un esquema XML (extensible markup language), donde se especifica la posición de cada nodo, como estos nodos se unen para formar una carretera y las reglas de paso que tendrá dicha intersección o calle en particular.

2.9.1.1 Modelación del escenario de tráfico

En la sección 6.1 se mostró la intersección elegida para el estudio de esta tesis. Después de seleccionar el escenario de transporte, esta debe ser traducida a una red de tráfico en SUMO. Este proceso puede ser hecho de manera muy fácil a través de la herramienta NETCONVERT incorporada en el paquete de instalación de SUMO. La figura 2.35 muestra el procedimiento para la generación del escenario de transporte



2.35 Procedimiento común para la generación de un escenario en SUMO. Adaptado de Krajewicz et al., (2012).

Como se observa en la figura 2.35 la herramienta netconvert necesita al menos tres archivos de entrada que definen las carreteras, las intersecciones y como estas están conectadas. NETCONVERT se encarga de generar el archivo de salida *net.xml* el cual contiene la representación digital de la red de transporte en un esquema XML. Para crear el archivo de salida se utiliza un archivo *.netcfg*, posteriormente este archivo se ejecuta haciendo uso de la consola de Windows para generar el escenario de transporte que posteriormente se cargará a un archivo *.sumocfg* que contendrá los archivos de entrada para que se lleve a cabo la simulación. La sintaxis de este archivo se observa en la figura 2.36. Al ejecutar el archivo *built.netcfg* se genera el archivo de salida que contiene toda la información de la red de transporte, incluyendo un plan semafórico elaborado por

el algoritmo de NETCONVERT, el cual descartamos ya que no se ajusta a los propósitos de esta tesis.

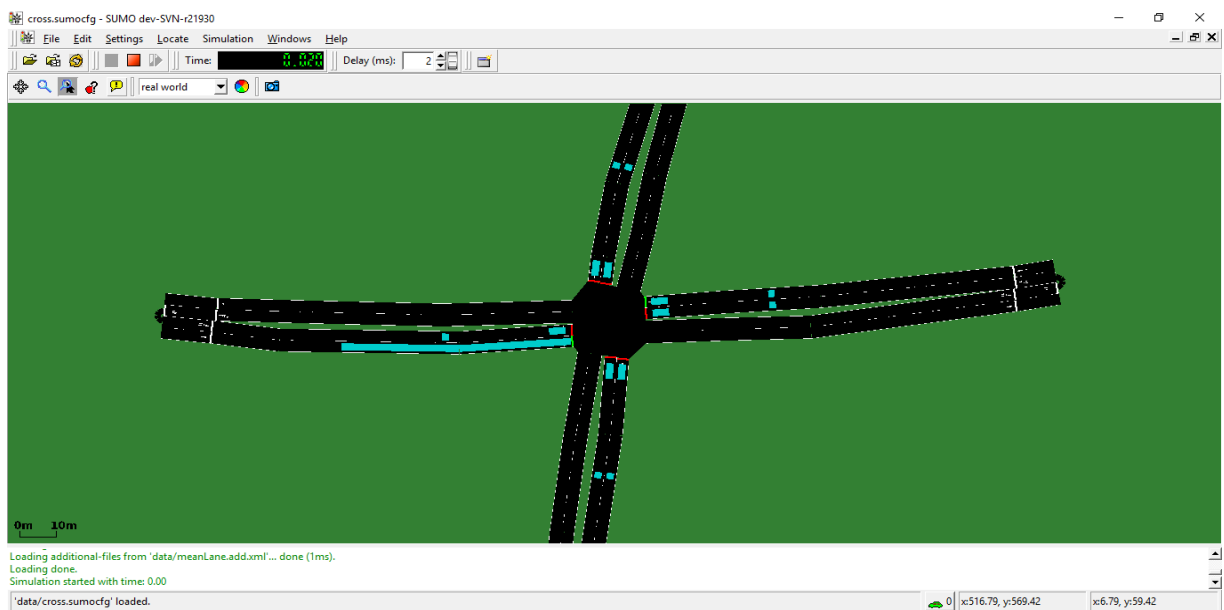
```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>

<configuration>
  <input>
    <node-files value="two-wayLane.nod.xml"/>
    <edge-files value=" two-wayLane.edg.xml"/>
    <type-files value=" two-wayLane.con.xml"/>
  </input>

  <output>
    <output-file value=" two-wayLane.net.xml"/>
  </output>
</configuration>
```

2.36 Parámetros de entrada para NETCONVERT. El archivo se guarda como built.netcfg.xml

SUMO cuenta con una aplicación incluida en el paquete de instalación que permite visualizar de manera gráfica el resultado de la simulación de transporte (ver figura 2.37).



2.37 visualización del entorno de transporte urbano mediante la herramienta sumo-gui incluida en el paquete de instalación de SUMO. (captura de pantalla).

2.9.1.2 Colocación de los sensores

Como se mencionó en la sección 2.6.3 los sensores se colocaron cerca de la línea de parada en el entorno de simulación. Estos son básicamente detectores de presencia que se comunican con el microcontrolador para indicar si hay un automóvil sobre su área efectiva de detección. En SUMO los detectores son cargados en un archivo *.add.xml* y su sintaxis se muestra en la figura 2.38.

```
<additional>
  <e2Detector id="E2_1i_U_0" lane="1i_0" pos="-35.0" length="62.3" tl="0"
to="2o_0" file="UE2_1i_0.txt" cont="0" timeThreshold="0.00" speedThreshold="5.00"
jamThreshold="10.00"/>
      :
      :
  <e2Detector id="E2_4i_U_1" lane="4i_1" pos="-35.6" length="1.8" tl="0"
file="UE2_4i_1.txt" cont="0" timeThreshold="0.00" speedThreshold="1.39"
jamThreshold="10.00"/>
</additional>
```

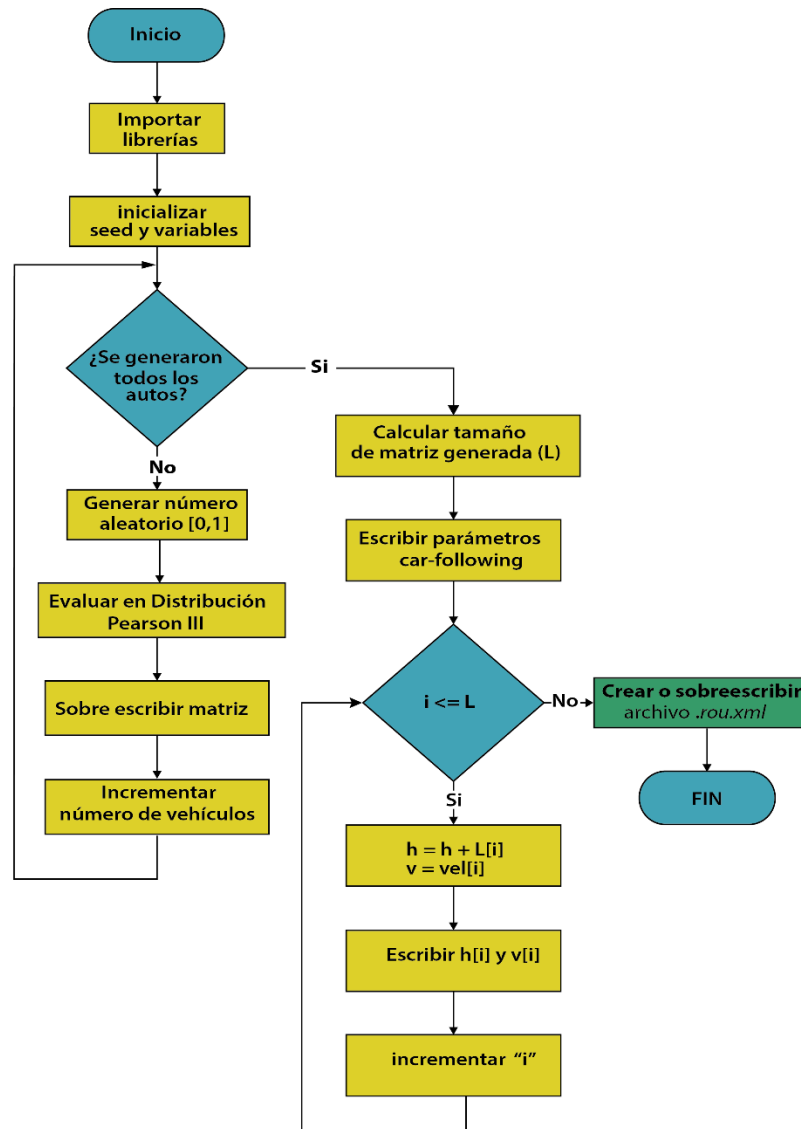
2.38 Sintaxis del archivo de configuración para los sensores de lazo inductivo.

SUMO tiene tres tipos de sensores a los que denomina E1 (lazo inductivo), E2 (detector de área), E3 (detector multi-entrada/ salida). Entre estas tres opciones decidimos hacer uso del sensor detector de área (E2) ya que se asemeja más al comportamiento del lazo inductivo diseñado y construido en esta tesis.

2.9.2 Algoritmo de generación de demanda

Como se describió en la sección 2.6.2 la generación de demanda sigue una distribución de intervalos de llegadas descritas por una función de densidad de probabilidad tipo Pearson III, las razones por las cuales se eligió esta distribución se exponen en dicha sección. SUMO cuenta con herramientas que permiten la generación de demanda, generalmente primero se especifica un archivo *.trip.xml* y un archivo *.flow.xml* para que las herramientas de generación de demanda construyan un archivo *..rou.xml* que contendrá la información de las características tanto físicas como dinámicas vehículo a vehículo. En pocas

palabras si se requiere simular 5,000 vehículos se tendrán que especificar de manera individual cada uno de los vehículos, lo que lo hace un proceso tedioso.



2.39 Flujograma para la generación de demanda.

Se utilizó el lenguaje de programación Python para generar el archivo *.rou.xml* y el algoritmo utilizado se presenta en la figura 2.40. Primeramente, se define una “seed” (semilla) que nos permitirá realizar diversas pruebas manteniendo inalterable el archivo de rutas y con ello las características físicas y dinámicas de la demanda. Siempre y cuando no haya un cambio de semilla, éste nos permitirá realizar distintas pruebas de rendimiento bajo distintos esquemas de control, y en

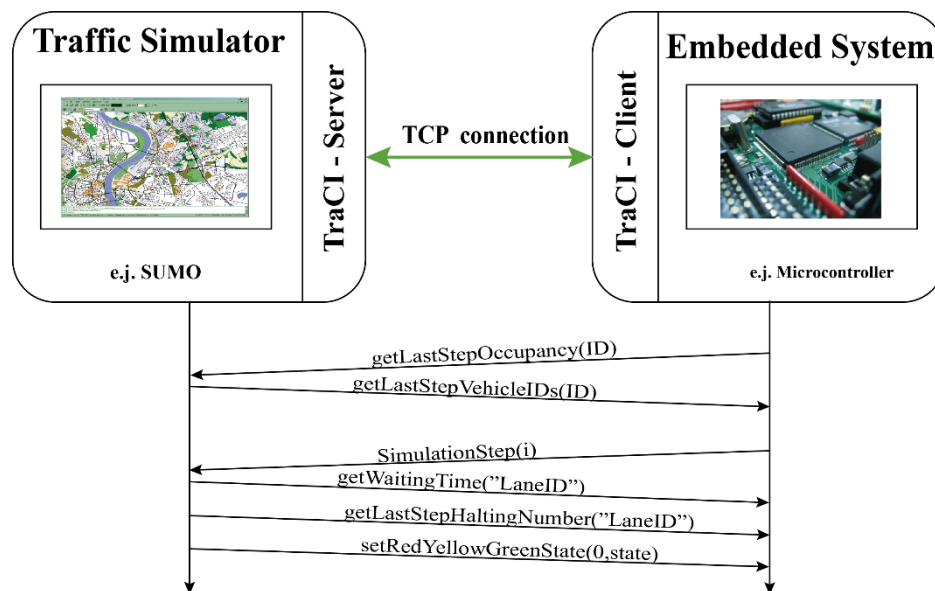
[illegible]

122

2.9.3 Interfaz de control de tráfico (TRACI)

SUMO incluye la librería TRACI (traffic control interface) la cual da acceso a todas las entidades del entorno de simulación, esta nos permite controlar en tiempo de ejecución diferentes objetos tales como vehículos, controlar el estado de los semáforos, recuperar valores de los tres tipos de sensores que pueden simularse en SUMO, y además información sobre cada una de las líneas.

La comunicación entre SUMO y TRACI se establece mediante una conexión TCP cuya arquitectura es representada en la figura 2.41.



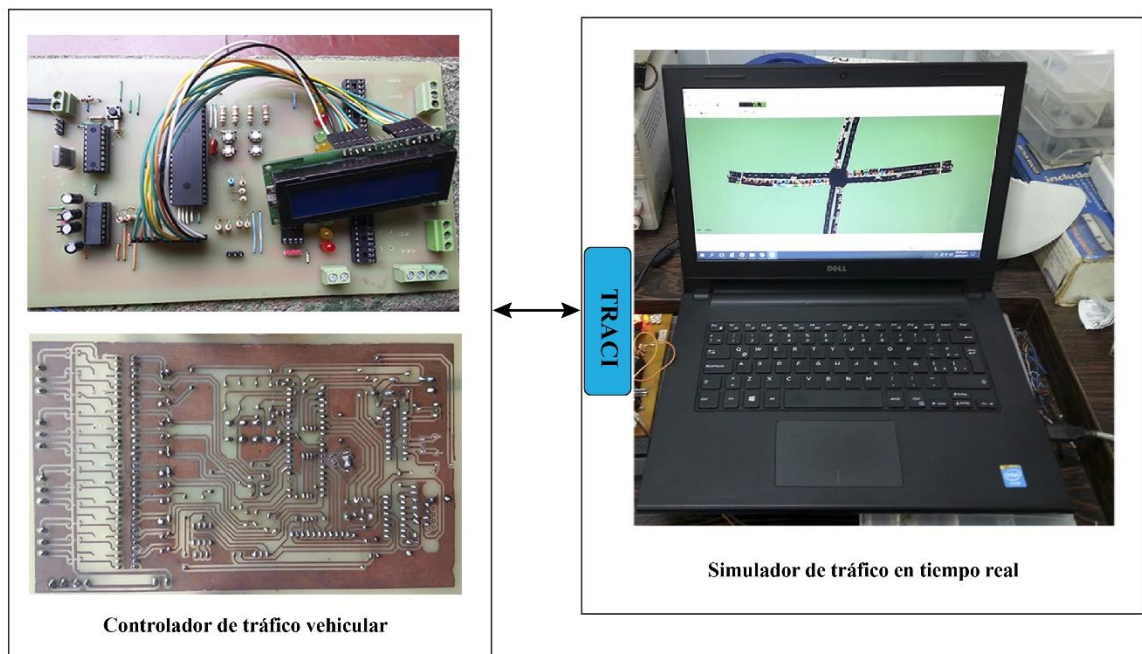
2.41 Arquitectura del sistema de control de tráfico vehicular y ejemplo de algunos comandos y su respuesta entre el simulador (software) y el controlador de tráfico (Hardware). Elaboración propia.

Como se observa en la figura 2.41 el sistema sigue una arquitectura hardware-in-the-loop donde la planta es completamente simulada mediante un simulador de tráfico microscópico y el controlador es un dispositivo físico cuyo interfaz de comunicación es mediante TRACI. En la figura también se muestran los comandos más importantes utilizados para tomar el control de la simulación, entre estos tenemos el comando “*simulationStep*” el cual nos permite controlar el tiempo en el que se ejecuta un paso de simulación, este tiempo es controlado completamente por el microcontrolador el cual en su algoritmo se implementa un

reloj en tiempo real (RTC, por sus siglas en inglés) que hace que cada 20ms se genere una interrupción el cual envía por medio del pin TX (RC6) un comando que es interpretado por una API en Python y comunica a TRACI que se ejecute un paso de simulación, mientras esta orden no sea dada el simulador de tráfico vehicular no ejecutará su simulación, esto garantiza que el tiempo de simulación y el tiempo manejado por el microcontrolador estén sincronizados.

El microcontrolador también ordena al simulador de tráfico cuando los semáforos deben cambiar su estado (cambio de luces) y además le dicta el estado que debe presentar en su entorno gráfico, esto lo hace mediante el comando `"setRedYellowGreenState"`. En este caso el controlador de señales cada cambio de fase le indica al simulador primeramente que la orden que le está indicando corresponde a un cambio de estado, seguidamente le indica el ID del semáforo al cual debe cambiarle el estado y por último le indica el nuevo estado de las luces.

En la figura 2.42 se observa la implementación del subsistema de control de tráfico como un conjunto de elementos de hardware que mediante TRACI se conecta a SUMO para validar la efectividad del controlador de tráfico.



2.42 Arquitectura hardware-in-the-loop. TRACI permite el intercambio de información entre el controlador implementado sobre una plataforma física y el simulador de tráfico.

2.9.4 Resultados obtenidos

Para comprobar la efectividad del controlador de tráfico desarrollado decidimos comparar el tiempo de espera promedio contra un controlador de tiempo fijo. Se eligió el controlador de tiempo fijo ya que es el esquema de control que comúnmente se encuentra en la mayoría de intersecciones en las diferentes intersecciones de Nicaragua. Ambas estrategias de control se simulan en SUMO bajo las mismas condiciones de tráfico durante 1 hora de simulación.

Cabe señalar que los parámetros de temporización para el caso del control de tiempo fijo se calcularon con extremo cuidado siguiendo la fórmula de Webster ampliamente utilizada en software como VISSIM, SINCHRO, LISA +, etc., y que es ampliamente estudiada y presentada por Akcelik (1981). La fórmula de Webster se basa en el cálculo del ciclo de tiempo óptimo y a partir del concepto de línea crítica se calcula el tiempo para cada una de las fases como una fracción del ciclo de tiempo total.

$$C = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_i} \quad \text{Fórmula 2.7}$$

Donde:

C = ciclo óptimo

L = tiempo perdido total debido a los intervalos amarillo y todo rojo

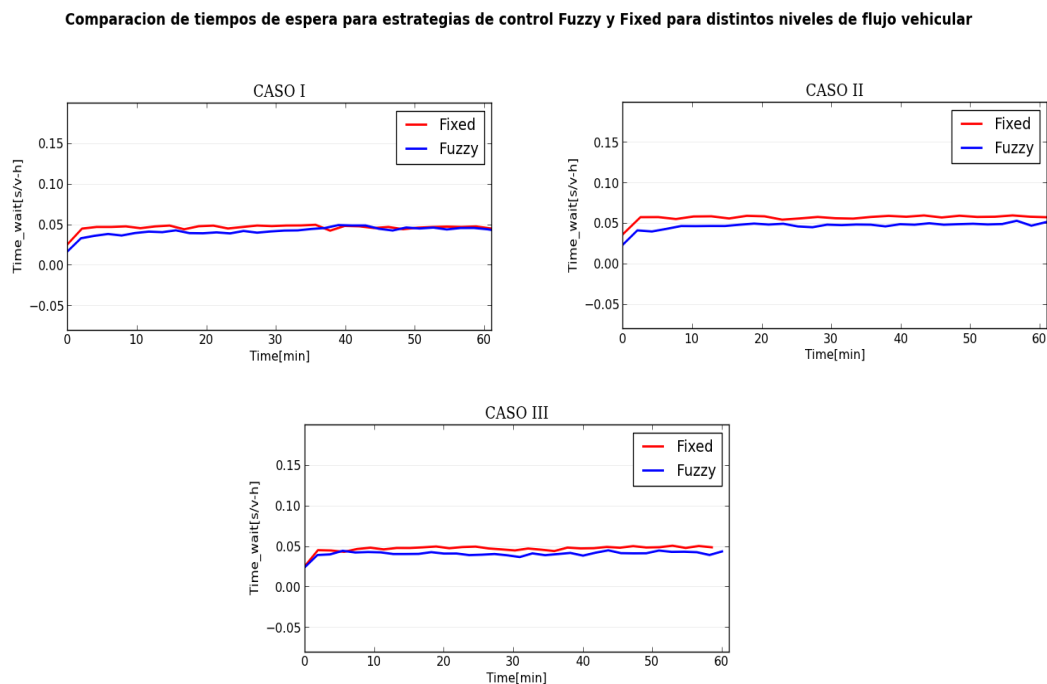
y_i = tasa de flujo equivalente a cociente entre el flujo actual y el flujo de saturación para el movimiento crítico.

n = número de fases.

Akcelik (1981) brinda muchos ejemplos de cómo llevar a cabo este cálculo, al igual que Roess et al. (2004).

Con el fin de comprobar la flexibilidad del controlador de tráfico se simularon tres tipos de escenarios. En el primer escenario se considera un poco de demanda vehicular sobre las cuatro vías de acceso (CASO I), en el caso del segundo escenario se considera una demanda intermedia de vehículos (CASO II), y el último escenario considera una demanda alta de vehículos (CASO III). Los detalles sobre los niveles cuantitativos de demanda y la mejora en términos del tiempo de espera promedio son mostrados en la gráfica 2.43 y en la tabla 2.7.

La medida de rendimiento utilizado en este trabajo monográfico es el tiempo de espera promedio en segundos por vehículos tomados en una hora. En la figura 2.43 podemos observar en el eje de las abscisas el tiempo transcurrido de simulación y en el eje de las ordenadas observamos el tiempo de espera promedio que consiste de la sumatoria del tiempo que han estado detenidos cierta cantidad de vehículos (la velocidad es inferior a 1m/s) divididos por la cantidad de vehículos detenidos y promediados a un intervalo de 1 hora (ver sección 1.4.7).



2.43 Comparación entre las estrategias de control de tiempo fijo y control difuso.

En la figura 2.43 observamos que existe una mejora en términos del tiempo promedio que se vuelve más significativa a medida que el flujo vehicular sobre los

accesos incrementa, esto se debe a que la fórmula propuesta por Webster sugiere un incremento en el ciclo a medida que la demanda incrementa, pero con ello también incrementa el tiempo de espera promedio. Por el contrario, el controlador propuesto en esta tesis no necesariamente incrementa el ciclo al incrementar el volumen de tráfico ya que como se menciona en la sección 2.7.3 la optimización en la temporización se da a nivel de ciclo y a nivel de reparto entre el ciclo; por tanto, los incrementos de demanda primero trataran de aliviarse reasignando el porcentaje de reparto entre las fases sin incrementar significativamente el ciclo en caso de que una línea en particular presente congestión.

Tabla 2.7 Resultados obtenidos bajo distintos volúmenes de tráfico.

FLUJO VEHICULAR PARA CADA ACCESO				TIEMPO DE ESPERA PROMEDIO [s]		
WEB [VPH]	WELB [VPH]	NSB [VPH]	NSLB [VPH]	FUZZY	FIXED	% MEJORA
450	360	360	360	149.08	165.11	9.6
510	240	510	240	145.57	167.81	13.25
600	240	510	240	167.27	203.42	17.77

*WEB : Acceso OESTE - ESTE

*WELB : Acceso OESTE - ESTE (giro a la izquierda)

*NSB : Acceso NORTE - SUR

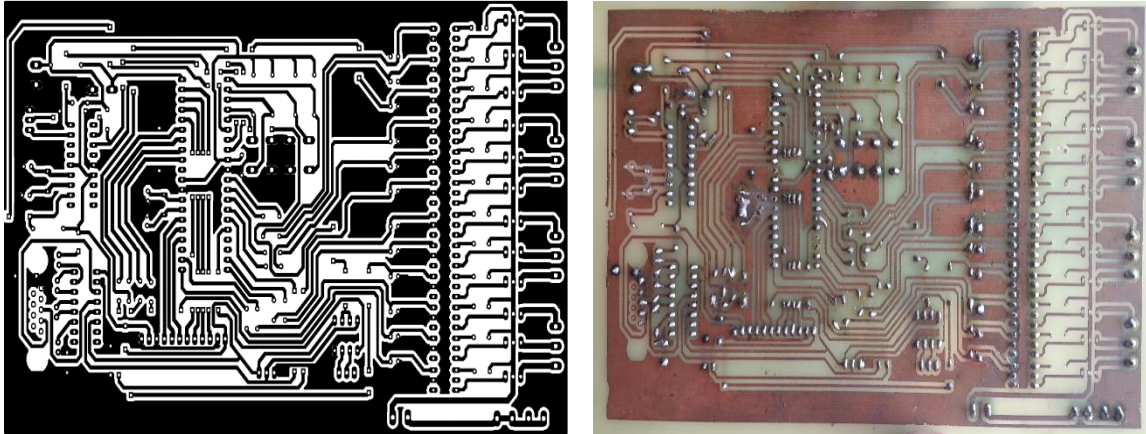
*NSLB : Acceso NORTE - SUR (giro a la izquierda)

VPH : Vehículos por hora

	Volumen bajo
	Volumen intermedio
	Volumen alto

2.10 Implementación en tarjeta impresa

Se procedió al diseño e implementación de la tarjeta de circuito impreso, para ello se utilizó el software EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor, por sus siglas en inglés) en su versión 7.3

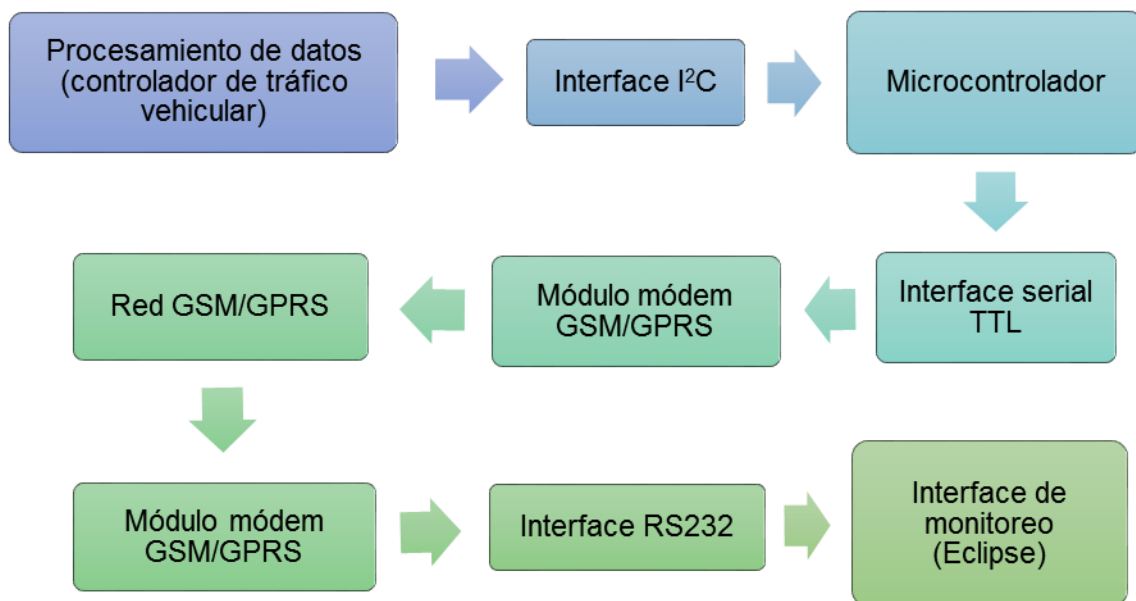


2.44 Izquierda: Pistas diseñadas en EAGLE. Derecha: Tarjeta con las pistas impresas.
(Elaboración propia).

2.11 Modelo del subsistema de monitoreo de flujo vehicular

El subsistema de monitoreo de flujo vehicular fue diseñado para que cumpla con los parámetros establecidos por el subsistema de control inteligente de semáforos, en cuanto a método de comunicación y las variables a enviar son elegidas en base a al uso que se les puede dar para el mejoramiento de la red vial.

El subsistema de monitoreo de tráfico se describe en la figura 2.45. El microcontrolador se encarga de recibir por medio de comunicación I²C los datos del controlador de tráfico y simultáneamente enviarlos al módem por medio de comandos AT utilizando el servicio de SMS hacia el centro de monitoreo que consiste en un módem conectado por RS232 al PC, que posee una interface en eclipse que se encarga de recibir, mostrar y almacenar los datos.



2.45 Esquema general del subsistema de monitoreo de tráfico vehicular

2.12 Determinación de los componentes del subsistema de monitoreo

2.12.1 Módulo módem

El módulo módem es el encargado de utilizar el servicio SMS para transmitir los datos a través de la red GSM y ser recibidos por el módem receptor en el centro de monitoreo donde se almacenan y se muestran en la interface de monitoreo.

En la tabla 2.8 se muestran las principales características del módem GSM/GPRS Sim 800I, debido a que este dispositivo es cuatro bandas puede operar en Nicaragua y ubicarse a cualquier distancia del sitio donde esté el controlador de tráfico vehicular.

Tabla 2.8 Características de módem GSM/GPRS Sim 800I

Módulo módem GSM/GPRS Sim 800I	
Bandas de frecuencia	850/900/1800/1900 MHz
Estación móvil	GPRS clase B
Comunicación serial	Serial nivel TTL
Interface antena	1
Interface de tarjeta sim	1

2.12.2 Microcontrolador

El microcontrolador se comunica con el módem GSM a través de comandos AT para enviar los datos a través de la red GSM. Debe cumplir con las siguientes funciones: Comunicarse a través del protocolo I²C con el controlador de tráfico vehicular cada cierto tiempo para leer los datos y enviarlos por comunicación serial TTL al módem GSM.

La tabla 2.9 muestra las características del PIC 16f88, que fue seleccionado debido a que posee un módulo de comunicación SSP, el cuál utilizamos en el modo I²C para comunicar el controlador de tráfico con el microcontrolador, la interface de comunicación serial AUSART nos permite comunicarnos con el módulo módem GSM/GPRS a través de los comandos AT. Así mismo, el uso del timer 0 nos permite controlar los retardos en milisegundos en nuestro código de programa en PIC C CCS, posee suficiente memoria de programa (32 Kbytes) y

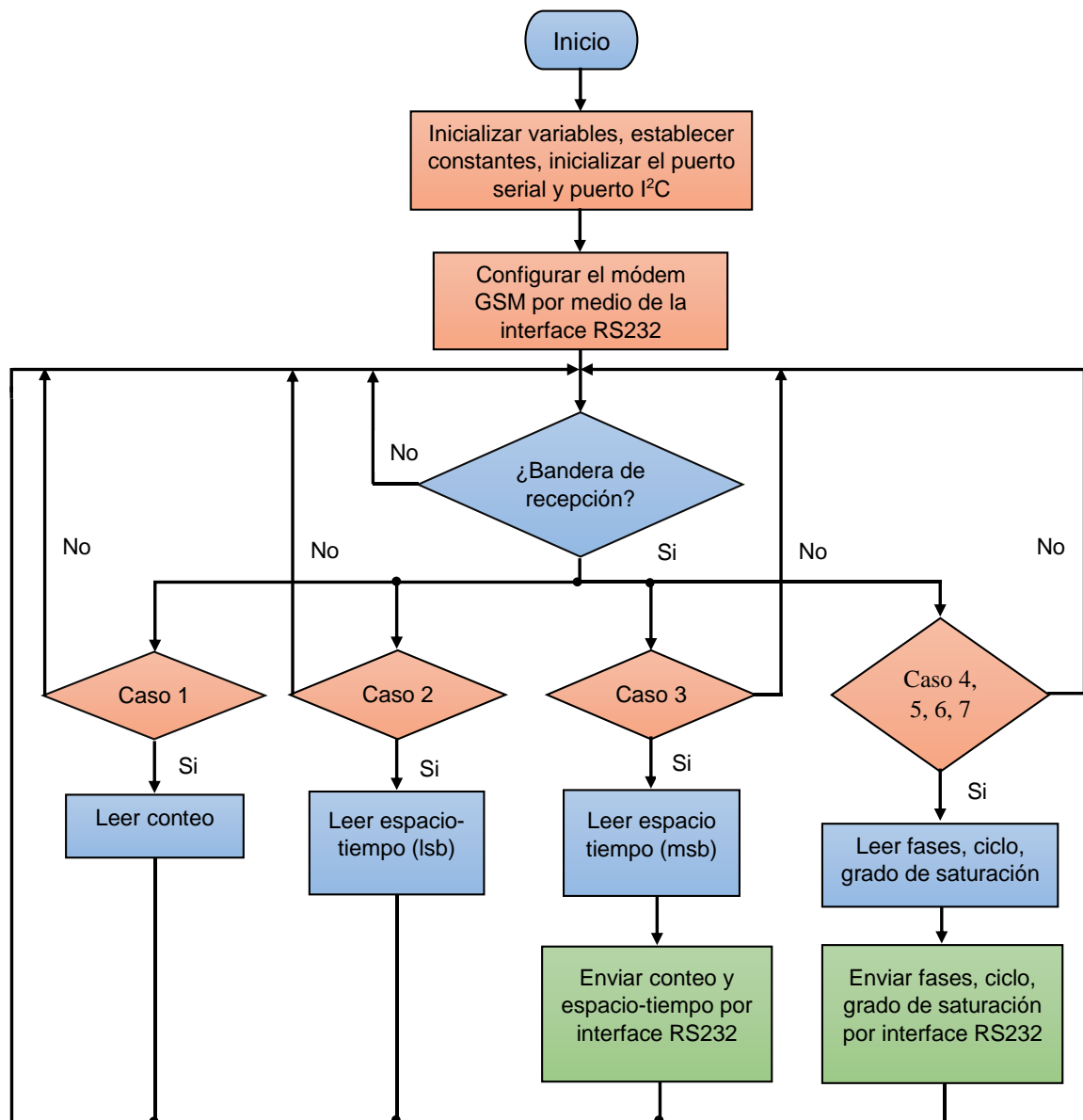
solamente dos puertos que bastan para las funciones que necesitamos utilizar; además su bajo costo lo hace propicio para nuestro sistema.

Tabla 2.9 Características PIC 16F88. Tomado de hoja de datos del fabricante

PIC 16F88	
Frecuencia de operación	DC-20 Mhz
Memoria de programa (Bytes)	7168
Memoria de programa (instrucciones)	4096
Memoria de datos (Bytes)	368
EEPROM (Bytes)	256
Fuentes de interrupción	12
Puertos E/S	Puerto A,B
Timers	3
Módulos CCP	1
Comunicación serial	SSP (modos SPI, I2C), AUSART
Módulo ADC 10 bit	7 canales de entrada
Comparadores	2
Reinicios y retardos	POR, BOR, \overline{MCLR} , WDT, PWRT, OST

2.11.2.1 Funcionamiento del algoritmo de comunicación

La figura 2.46 muestra el flujograma del transmisor, primero se inicializa el puerto serial y el puerto I²C en modo slave, a continuación, se configura el módem GSM por medio de la interface RS232. Los datos que el microcontrolador recibe del controlador de tráfico están divididos en siete grupos, los primeros tres son conteo, espacio-tiempo LSB (Least Significant Bit), espacio-tiempo MSB (Most Significant Bit), el conteo y espacio-tiempo se recibe y seguidamente se envía cada minuto. Los demás datos son dos fases, ciclo y grado de saturación, que se identifican según el caso que se reciba. Posteriormente estos datos son enviados por la interface serial RS232 utilizando el servicio de SMS (Short Message Service) de la red GSM. En la tabla 2.10 se detalla la asignación de pines del PIC 16F88 para el transmisor de datos.



2.46 Flujograma del transmisor del subsistema de monitoreo

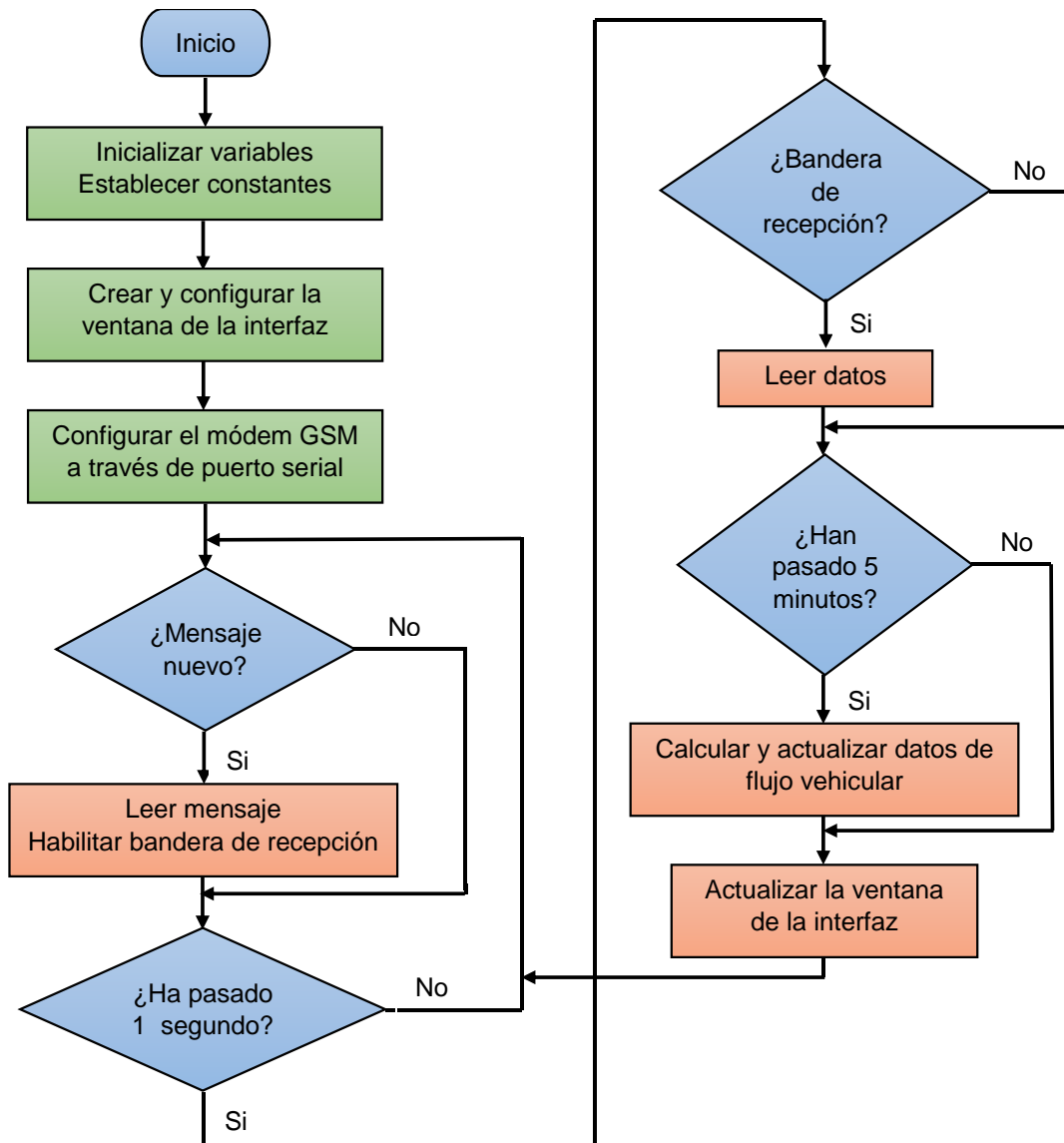
Tabla 2.10 Asignación de pines PIC 16F88

Asignación de pines PIC 16F88			
PIN	Nombre	Tipo de dato	Descripción
4	RA5	Entrada	Botón de reset (Master
5	VSS	Entrada	GND alimentación
7	RB1	Entrada/Salida	I ² C SDA
8	RB2	Entrada/Salida	AUSART RX
10	RB4	Entrada/Salida	I ² C SCL
11	RB5	Entrada/Salida	AUSART TX
14	VDD	Entrada	VDD +5 V alimentación
15	RA6/OSC2	Entrada	Oscilador
16	RA7/OSC1	Entrada	Oscilador

2.11.3 Interfaz de monitoreo

La función de la interfaz de monitoreo es recibir los datos por SMS a través del módem GSM. La comunicación del módem con la computadora se realiza a través del protocolo RS232, y cuenta con un circuito compuesto por un max232 para convertir los niveles de voltaje TTL a los del protocolo RS232 y viceversa. Eclipse es la plataforma de software donde se implementó dicha interfaz.

En la figura 2.47 observamos el flujograma de la interfaz de monitoreo. La interfaz de usuario utiliza las clases y métodos disponibles en la API de Java para la implementación de la interfaz gráfica. Los paquetes AWT, IO, ImageIO y Swing son importados al principio del código. AWT permite trabajar al programador con ventanas y sus elementos más básicos. IO permite realizar operaciones con los sistemas entrada y salida tales como el teclado, y además permite acceder algunas funcionalidades del sistema de archivos. ImageIO fue utilizado para trabajar adecuadamente con las imágenes utilizadas. Swing al igual que AWT sirve para trabajar con la interfaz gráfica.



2.47 Flujograma de la interfaz de monitoreo

La clase MainWindow extiende a JFrame y por tanto hereda todos los métodos disponibles para esta clase que se ocupa de generar y manejar funcionalidades de una ventana. Luego implementa la clase Runnable para poder implementar el método Run que se encarga de generar un hilo que la computadora pueda identificar y actualizar cuando fuera necesario.

En el método principal del programa se crea un objeto de la clase MainWindow, luego usando los métodos heredados de la clase JFrame, se le da tamaño a la ventana, se maximiza, se le da un título, se le da una imagen de icono, se pone

visible y se ejecuta el hilo que la mantendrá en ejecución. Cuando se crea el objeto de la clase MainWindow, se ejecuta el método constructor que garantiza que se carguen las imágenes a utilizar, la que se usará de fondo, la que forma la intersección y la que corresponde al icono a utilizar.

El método Run es el método principal y se ejecuta como un bucle infinito permitiéndole garantizar que se realicen todas las tareas necesarias para que el programa se comunique con el modem GSM y procese todos los datos de tráfico vehicular. Parte de estos datos son almacenados en un archivo de Excel cada cierto tiempo lo que se puede configurar en el código. Otros datos son procesados para ser mostrados en la interfaz de usuario. Se usan los métodos paint y update para mostrar los datos en la ventana.

El método paint se usa primero y solo cada vez que la ventana se activa, es decir pasa a primer plano. Se encarga de poner en primer lugar el escenario estático es decir aquellos elementos que no se cambian como las imágenes de fondo. Luego pone el escenario dinámico, todos los datos de tráfico vehicular que cambian con el tiempo. Para ello utiliza un fondo de cierto color, gris en este caso, para que con facilidad pueda ser reemplazado por el método update.

El método update lo único que hace es dibujar sobre lo que ya fue trazado por paint. Por eso se pone un fondo gris antes de los datos para actualizarlos poniendo ese mismo fondo gris sobre datos antiguos y luego los datos nuevos. En ambos métodos paint y update se pueden dibujar formas geométricas simples texto y otros elementos más sofisticados como botones y menús. Se eligieron los más sencillos solo con el fin de demostrar que incluso estos pueden aparecer adecuados al usuario.

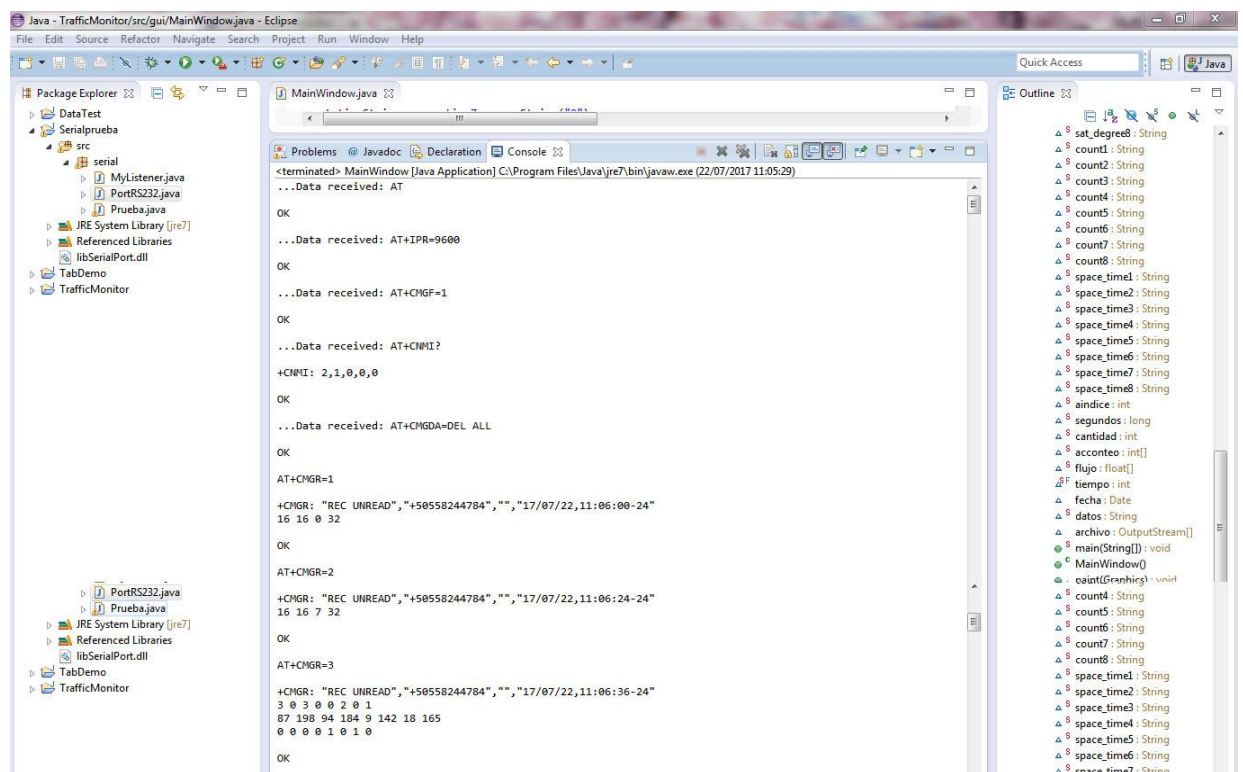
2.13 Prueba de campo

Para comprobar la efectividad del sistema de monitoreo se procedió a realizar una prueba de campo en la que se utilizan datos de la simulación de tráfico en SUMO para enviarlos del controlador de tráfico al microcontrolador encargado de enviar los datos por SMS. Estos datos son recibidos por el otro módem en el centro de

monitoreo y leídos por la interfaz de monitoreo, y además se almacenan los datos de flujo de tráfico en un archivo de Excel, los cuales se guardan cada cinco minutos.

Durante la prueba que duró 25 minutos observamos como resultado que los datos eran enviados correctamente, a excepción del conteo que es enviado cada minuto, pero no fue enviado en 4 ocasiones debido probablemente a que eran recibidos por el microcontrolador casi al mismo tiempo que los datos de las fases por lo que no se podían ejecutar todos los comandos para el envío del mensaje.

En la figura 2.48 se observa la plataforma Eclipse mientras se corre el código y se muestra la interacción con el módem GSM/GPRS, su configuración y recepción de SMS. Se establece el baud rate, se selecciona el formato de SMS en modo texto, se configura la notificación de mensaje nuevo y se borran todos los mensajes en la tarjeta SIM.

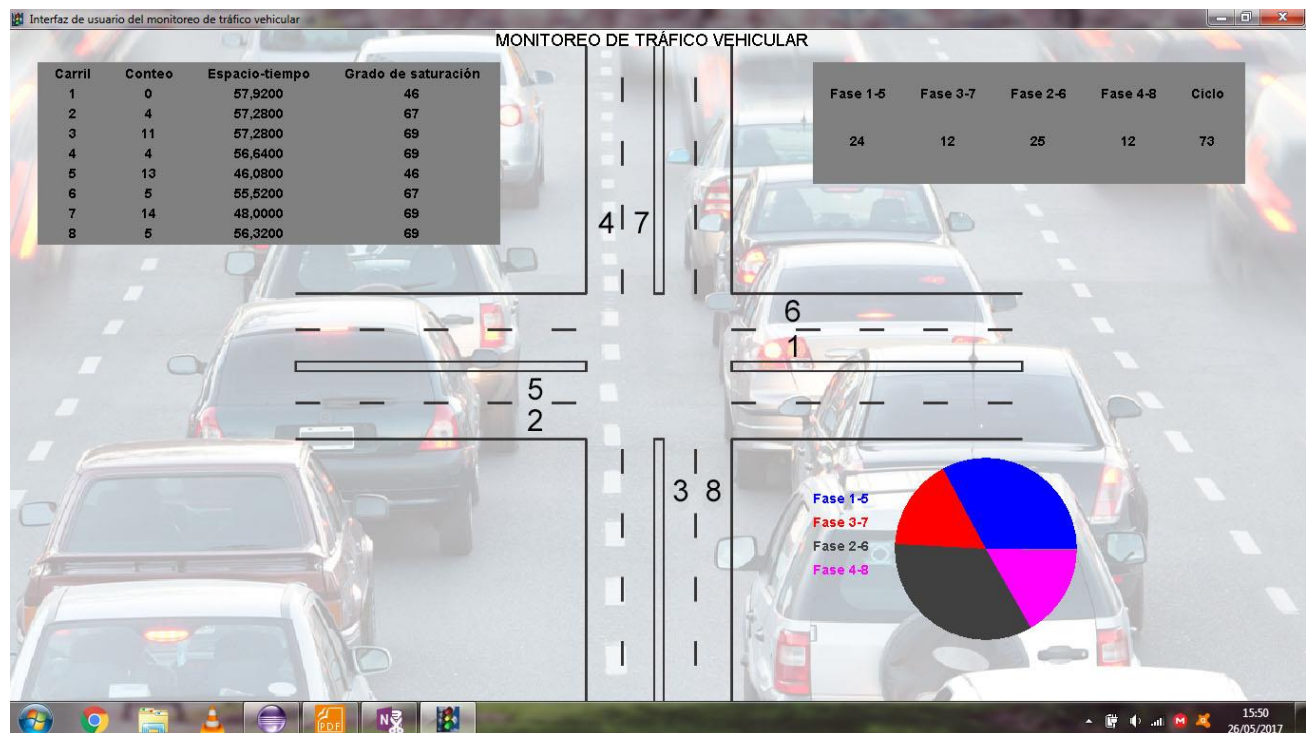


```
<terminated> MainWindow [Java Application] C:\Program Files\Java\jre7\bin\javaw.exe (22/07/2017 11:05:29)
...Data received: AT
OK
...Data received: AT+IPR=9600
OK
...Data received: AT+CMGF=1
OK
...Data received: AT+CMQI?
+CMQI: 2,1,0,0,0
OK
...Data received: AT+CMGDA=DEL ALL
OK
AT+CMGR=1
+CMGR: "REC UNREAD","+50558244784","", "17/07/22,11:06:00-24"
16 16 0 32
OK
AT+CMGR=2
+CMGR: "REC UNREAD","+50558244784","", "17/07/22,11:06:24-24"
16 16 7 32
OK
AT+CMGR=3
+CMGR: "REC UNREAD","+50558244784","", "17/07/22,11:06:36-24"
3 0 3 0 0 2 0 1
07 190 94 184 9 142 18 165
0 0 0 1 0 1 0
OK
```

2.48 Código en la plataforma de software Eclipse

Posteriormente se empiezan a recibir los datos, las fases y grado de saturación se actualizan al finalizar cada ciclo, mientras que el conteo y espacio tiempo cada minuto.

En la figura 2.49 observamos la interfaz gráfica de monitoreo de flujo vehicular, donde se despliegan los datos que se están leyendo y guardando desde el módem y se actualizan cada un segundo; además los datos de flujo de tráfico vehicular (veh/min) se almacenan cada cinco minutos, y es lo que constituye una base de datos histórica de las características y comportamiento del tráfico en dicha intersección aislada.



2.49 Interfaz de monitoreo de flujo vehicular

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar el trabajo monográfico se logró diseñar un sistema de monitoreo de flujo vehicular y control inteligente de semáforos que es capaz de utilizar variables de carácter microscópico del tráfico que mediante un algoritmo de inferencia difusa y la información obtenida a través de lazos inductivos es capaz de tomar decisiones con respecto a la temporización que converge hacia el objetivo propuesto. A corto plazo se logró una mejora significativa con respecto al tiempo de espera promedio, y a largo plazo se propone el uso de las variables de tráfico recolectadas para la toma de decisiones con respecto a obras civiles en la intersección.

- Se diseñó e implementó un subsistema de detección vehicular (detector de lazo inductivo) con 93% de exactitud, capaz de detectar todo tipo de vehículo a un costo asequible. El subsistema es fácilmente configurable y se puede utilizar en variedad de situaciones de tráfico vehicular.
- Se realizó el diseño e implementación de cada uno de los subsistemas dando como resultado un sistema de gestión de tráfico capaz de interpretar de manera cualitativa aspectos generales de la corriente de tráfico vehicular y reaccionar de forma dinámica ajustando los parámetros de temporización basándose en la información obtenida a través de sensores de lazo inductivos ubicados en la línea de parada para cada uno de los accesos.
- Se construyó y probó un detector de lazo inductivo que cumpliera los requerimientos impuestos por el subsistema de control de tráfico vehicular, permitiéndole conocer adecuadamente la situación de tráfico vehicular como fue descrito en esta tesis.
- Se evaluó el rendimiento del controlador de tráfico vehicular haciendo uso de una simulación de tráfico microscópica y valiéndonos de herramientas de procesamiento de datos implementadas sobre el lenguaje de programación Python corroboramos que el sistema de control propuesto

disminuye sustancialmente el tiempo de espera promedio (hasta en un 17.77 %), lo cual verifica el cumplimiento del objetivo general propuesto.

- Se implementó un algoritmo de inferencia difusa capaz de controlar una intersección de cuatro accesos con giros a la izquierda protegidos siguiendo un esquema de fase “leading left turn”, sobre un microcontrolador de gama alta de 8 bits, logrando optimizar los tiempos de ejecución para cada una de las tareas y un manejo eficiente de la memoria RAM, ROM e interrupciones, logrando con esto un sistema de control económico con componentes fácilmente asequibles.
- Se diseñó e implementó un subsistema de monitoreo de flujo vehicular que cumple con el propósito de enviar datos de tráfico vehicular a un centro especializado donde se muestran en una ventana interactiva al usuario y se almacenan en un archivo de Excel, lo que permite desarrollar una base de datos histórica de flujo de tráfico para apoyar la planeación y evaluación de proyectos de mejoramiento vial.

Recomendaciones

- Añadir al subsistema de detección la capacidad de medir la velocidad de los vehículos por medio de dos lazos inductivos ubicados a cierta distancia, esto añadiría un dato de vital importancia en el análisis de tráfico a largo plazo.
- Debido a las limitaciones temporales limitamos este estudio a las intersecciones de tráfico aisladas, sin embargo, a lo interno de las ciudades este escenario es poco común ya que en realidad las intersecciones forman una red “grillada”, lo que supone intersecciones muy cercanas. Por tanto, recomendamos ampliar este estudio a este tipo de intersecciones donde el concepto de coordinación es esencial para el rediseño del sistema de inferencia difuso.
- Permitirle al subsistema de detección leer la firma de cada vehículo y poder clasificarlo, lo que podría ayudar tanto al subsistema de control como el de monitoreo de tráfico vehicular.

- Dado que en este estudio nos enfocamos en optimizar las variables temporales de las señales de tráfico (semáforos), dejamos por un lado el orden en el que las fases son presentadas (programación de fases) siguiendo un esquema de fase fija. Recomendamos realizar el diseño de un nuevo sistema de inferencia difusa que sea capaz de tomar decisiones en cuanto al orden en el que las fases son presentadas.
- Agregar la función de servicios de información al viajero, como por ejemplo detección de vías congestionadas y accidentes de tráfico por medio de SMS. Así como sugerencias de vías alternativas para evitar la congestión vehicular.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Akcelik, R. (1978). X and Y in traffic signal desing. *Proceedings of the ninth australian road research conference*, 45-60.
- Akcelik, R. (1981). Traffic signals: Capacity and timing analysis. *Australian Road Research Board*, 1-108.
- Akcelik, R. (1994). Estimation of green times and cycle time for vehicle-actuated signal. *Transportation research record*, 63-72.
- Akcelik, R. (1997). Fundamental traffic variables in adaptive control and the SCATS DS Parameter. *Third International Conference of ITS Australia*.
- Akcelik, R. (2002). Queue discharging flow and speed models for signalised intersections. *International symposium on transportation and traffic theory*, 2-20.
- Anderson, J. M., Sayer, T. M., & Bell, M. G. (1998). Optimization of a fuzzy logic traffic signal controller by multiobjetive genetic algorithm. *Road Transport Information and Control*, 186-190.
- Blaiklock, P. (2010). *A portable, wireless inductive-loop vehicle counter*.
- Chiu, S., & Chang. (1993). Self-organizing traffic control via fuzzy logic. *IEEE Conf. on Decision & control*, 32, 1-6.
- Cox, E. (1994). *The fuzzy systems handbook: A practitioner's guide to build, using, and maintaining fuzzy systems*. USA: AP Pofessional.
- Engelbrecht, R. (2001). Using hardware-in-the-loop traffic simulation to evaluate traffic signal controller features. *Annual conference of IEEE industrial electronics society*(27), 1920-1925.
- Gordon, R. (2016). *Intelligent transportation system: functional desing for effective traffic Management* (Segunda ed.). New York,USA: Springer.
- Gordon, R. L., Tighe, W., United States., Dunn Engineering Associates., & Siemens ITS. (2005). *Traffic control system handbook*. Washington, DC.
- HCM. (2000). *Highway capacity manual*. Washington,D.C: Transportation Research Board.
- Jang, R. j., Sun, C., & Mizutani, E. (1997). *Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence*. USA: Prentice-Hall.
- Johansson, S. (2005). New frequency counting principle improves resolution. *Proceeding Frequency Control Symposium*. 628-635.

- Klein, Lawrence A. (2006). *Traffic Detector Handbook: Third Edition - Volume I*. Rancho Palos Verdes, CA: Lawrence A. Klein.
- Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., & Bieker, L. (2012). Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International journal on advances in systems and measurement*, 5(3 & 4), 128-138.
- Luk, J. (1989). *Modeling & monitoring the performance of urban traffic control system*. Australian Road Research Board, Victoria, Australia.
- Mahdiani, H. R., Banaiyan, A., Javadi, M. H., Fakhraie, S. M., & Lucas, C. (2013). Defuzzification block: new algorithms, and efficient hardware and software implementation issues. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*(26), 162-172.
- Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the institution of electrical engineers control & science*(12), 1585-1588.
- Masher, D. P. (25 de febrero de 1975). *Patente n° 3868626*. Estados Unidos de América.
- May, A. D. (1990). *Traffic flow fundamentals*. United States of America: Prentice-Hall, Inc.
- Morris, A. S. (2001). *Measurement and instrumentation principles*.
- Mazidi, M. A., Mckinlay, D., & Causey, D. (2008). *PIC Microcontroller and Embedded System - Using Assembly and C for PIC18*. United State of America: Pearson: Prentice Hall.
- Patyra, M. j., & Mlynek, D. M. (1996). *Fuzzy logic: implementation and applications*. New York: Wiley.
- Potter, T. y Reno, A. (2005). The evolution of inductive loop detector technology. *Reno A&E*.
- Robertson, D. I., & Bretherton, D. R. (1991). Optimizing Networks of Traffic Signals in Real Time - the SCOOT Method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 11-15.
- Roess, R., Prassas, E., & McShane, W. (2004). *Traffic Engineering* (Tercera ed.). New Jersey: Pearson.
- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications* (Tercera ed.). Singapore: Wiley.
- Salter, R. (1974). *Highway traffic analysis and desing*. London: Macmillan Education.

- Shiri, S., & Maleki, H. (2016). Maximum green time setting for traffic-actuated signal control at isolated intersection using fuzzy logic. *International Journal of Fuzzy System*, 1-10.
- Sims, A., & Dobinson, k. (1979). The sydney coordinate adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits. *International symposium on Traffic Control System*, 130-137.
- Trabia, B., Kaseko, s., & Ande, M. (1999). A two-stage fuzzy logic controller for traffic signals. *Transportation Research*, 353-367.
- Weneger, A., Piorkowski, M., Hellbruck, H., Fischer, S., & Hubaux, J.-P. (2008). TRACI: An interface for coupling road traffic and network simulators. *in Proc. of CNS'08*, 155 - 163.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *information and control*(8), 338-353.